ПЕРЫЯДЫЧНАЯ СІСТЭМА ХІМІЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАЎ Д. І. МЕНДЗЯЛЕЕВА

Перыядычны закон Д. І. Мендзялеева

Уласцівасці атамаў хімічных элементаў, а таксама састаў і ўласцівасці ўтвараемых імі рэчываў знаходзяцца ў перыядычнай залежнасці ад зарадаў атамных ядраў.

Перыяды	ГРУПЫ ЭЛЕМЕНТАЎ																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	IA																	VIIIA
1	1,00794 1 H ВАДАРОД	IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	4,0026 2 He ГЕЛІЙ
2	6,941 3 Li ЛІТЫЙ	9,0122 4 Be БЕРЫЛІЙ											10,811 5 B БОР	12,011 6 C ВУГЛЯРОД	14,007 7 N АЗОТ	15,9994 8 O КІСЛАРОД	18,9984 9 F ФТОР	20,1797 10 Ne НЕОН
3	22,9898 11 Na НАТРЫЙ	24,305 12 Mg МАГНІЙ	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB			IB	IIB	26,9815 13 Al АЛЮМІНІЙ	28,086 14 Si КРЭМНІЙ	30,9738 15 P ФОСФАР	32,066 16 S СЕРА	35,452 17 Cl ХЛОР	39,948 18 Ar АРГОН
4	39,0983 19 K КАЛІЙ	40,078 20 Ca КАЛЬЦЫЙ	44,956 21 Sc СКАНДЫЙ	47,87 22 Ti ТЫТАН	50,942 23 V ВАНАДЫЙ	51,996 24 Cr ХРОМ	54,938 25 Mn МАРГАНЕЦ	55,845 26 Fe ЖАЛЕЗА	58,933 27 Co КОБАЛЬТ	58,693 28 Ni НІКЕЛЬ	63,546 29 Cu МЕДЗЬ	65,39 30 Zn ЦЫНК	69,723 31 Ga ГАЛІЙ	72,61 32 Ge ГЕРМАНІЙ	74,922 33 As МЫШ'ЯК	78,96 34 Se СЕЛЕН	79,904 35 Br БРОМ	83,80 36 Kr КРЫПТОН
5	85,468 37 Rb РУБІДЫЙ	87,62 38 Sr СТРОНЦЫЙ	88,906 39 Y ІТРЫЙ	91,224 40 Zr ЦЫРКОНІЙ	92,906 41 Nb НІОБІЙ	95,94 42 Mo МАЛІБДЭН	[98] 43 Tc ТЭХНЕЦЫЙ	101,07 44 Ru РУТЭНІЙ	102,905 45 Rh РОДЫЙ	106,42 46 Pd ПАЛАДЫЙ	107,868 47 Ag СЕРАБРО	112,411 48 Cd КАДМІЙ	114,82 49 In ІНДЫЙ	118,71 50 Sn ВОЛАВА	121,76 51 Sb СУРМА	127,60 52 Te ТЭЛУР	126,904 53 I ЁД	131,29 54 Xe КСЕНОН
6	132,905 55 Cs ЦЭЗІЙ	137,327 56 Ba БАРЫЙ	57-71	178,49 72 Hf ГАФНІЙ	180,9479 73 Ta ТАНТАЛ	183,85 74 W ВАЛЬФРАМ	186,207 75 Re РЭНІЙ	190,2 76 Os ОСМІЙ	192,22 77 Ir ІРЫДЫЙ	195,08 78 Pt ПЛАЦІНА	196,96654 79 Au ЗОЛАТА	200,59 80 Hg РТУЦЬ	204,3833 81 Tl ТАЛІЙ	207,2 82 Pb СВІНЕЦ	208,98037 83 Bi ВІСМУТ	208,9824 84 Po ПАЛОНІЙ	209,9871 85 At АСТАТ	222,0176 86 Rn РАДОН
7	[223] 87 Fr ФРАНЦЫЙ	[226] 88 Ra РАДЫЙ	89-103	[261] 104 Rf РЭЗЕРФАРДЫЙ	[262] 105 Db ДУБНІЙ	[266] 106 Sg СІБОРГІЙ	[264] 107 Bh БОРЫЙ	[269] 108 Hs ХАСІЙ	[268] 109 Mt МЭЙТНЭРЫЙ	[271] 110 Ds ДАРМШТАДТЫЙ	[272] 111 Rg РЭНТГЕНІЙ	[277] 112 Cn КАПЕРНІКІЙ	[284] 113 Uut	[287] 114 Fl ФЛЁРАВІЙ	[288] 115 Uup	[291] 116 Lv ЛІВЕРМОРЫЙ	[293] 117 Uus	[293] 118 Uuo

Лантаніды

138,9055 57 La ЛАНТАН	140,115 58 Ce ЦЭРЫЙ	140,907 59 Pr ПРАЗЕАДЫМ	144,24 60 Nd НЕАДЫМ	144,913 61 Pm ПРАМЕТЫЙ	150,36 62 Sm САМАРЫЙ	151,965 63 Eu ЕЎРОПІЙ	157,25 64 Gd ГАДАЛІНІЙ	158,92534 65 Tb ТЭРБІЙ	162,50 66 Dy ДЫСПРОЗІЙ	164,93032 67 Ho ГОЛЬМІЙ	167,26 68 Er ЭРБІЙ	168,93421 69 Tm ТУЛІЙ	173,04 70 Yb ІТЭРБІЙ	174,967 71 Lu ЛЮТЭЦЫЙ

Актыніды

[227] 89 Ac АКТЫНІЙ	232,0381 90 Th ТОРЫЙ	231,0359 91 Pa ПРАТАКТЫНІЙ	238,0289 92 U УРАН	237,0482 93 Np НЕПТУНІЙ	244,0642 94 Pu ПЛУТОНІЙ	243,0614 95 Am АМЕРЫЦЫЙ	247,0703 96 Cm КЮРЫЙ	247,0703 97 Bk БЕРКЛІЙ	251,0796 98 Cf КАЛІФОРНІЙ	252,083 99 Es ЭЙНШТЭЙНІЙ	257,0951 100 Fm ФЕРМІЙ	258,099 101 Md МЕНДЗЯЛЕВІЙ	259,1009 102 No НОБЕЛІЙ	260,105 103 Lr ЛАЎРЭНСІЙ

ФІЗІКА

Вучэбны дапаможнік для 10 класа
ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі
з беларускай мовай навучання

Дапушчана
Міністэрствам адукацыі
Рэспублікі Беларусь

Мінск
«Адукацыя і выхаванне»
2013

УДК 53(075.3=161.3)
ББК 22.3я721
Ф50

Аўтары: А. У. Грамыка, У. І. Зяньковіч, А. А. Луцэвіч, І. Э. Слесар

Пераклад з рускай мовы М. Н. Гальпяровіча, Т. У. Данілавай, Г. І. Кашэўнікавай

Рэцэнзенты: кафедра лазернай фізікі і спектраскапіі ўстановы адукацыі «Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы» (доктар фізіка-матэматычных навук, прафесар, загадчык кафедры *С. С. Ануфрык*; кандыдат педагагічных навук, дацэнт *М. В. Мацецкі*); начальнік цэнтра развіцця рэгіянальнай адукацыі дзяржаўнай установы адукацыі «Віцебскі абласны інстытут развіцця адукацыі», метадыст вышэйшай катэгорыі *І. А. Сітнікава*; настаўнік фізікі вышэйшай катэгорыі дзяржаўнай установы адукацыі «Сярэдняя школа № 36 г. Мінска» *Т. І. Журава*

Фізіка : вучэб. дапам. для 10-га кл. устаноў агул. сярэд. адукацыі з беларус.
Ф50 мовай навучання / А. У. Грамыка [і інш.]; пер. з рускай мовы М. Н. Гальпяровіча, Т. У. Данілавай, Г. І. Кашэўнікавай. — Мінск : Адукацыя і выхаванне, 2013. — 272 с. : іл.

ISBN 978-985-471-584-1.

УДК 53(075.3=161.3)
ББК 22.3я721

ISBN 978-985-471-584-1

ЯК ПРАЦАВАЦЬ З ВУЧЭБНЫМ ДАПАМОЖНІКАМ

Перад вамі вучэбны дапаможнік «Фізіка» для 10 класа. У гэтым навучальным годзе вы будзеце працягваць вывучэнне цеплавых і электрамагнітных з'яў у раздзелах «Малекулярная фізіка» і «Электрадынаміка». Каб работа з дадзеным дапаможнікам прынесла больш карысці, выкажам некалькі парад.

Спачатку прачытайце параграф ад пачатку да канца, а затым бярыцеся за яго дэталёвую прапрацоўку. Неабходна не толькі засвоіць яго змест, але і вывучыць азначэнні фізічных паняццяў, фізічных велічынь, асноўныя формулы, правілы, законы і прынцыпы.

Звярніце ўвагу на абазначэнні, якія выкарыстоўваюцца ў тэксце вучэбнага дапаможніка: Δ — прырашчэнне (змяненне) фізічнай велічыні, г. зн. рознасць паміж яе канчатковым і пачатковым значэннямі; $-\Delta$ — змяншэнне велічыні, г. зн. рознасць паміж яе пачатковым і канчатковым значэннямі; δ — элементарнае значэнне велічыні (напрыклад, δA — элементарная работа).

Ілюстрацыі і апісанні доследаў дапамогуць вам значна лепш зразумець фізічныя з'явы, аб якіх гаворыцца ў тэксце вучэбнага дапаможніка. Інфармацыя, пададзеная ў табліцах, мае даведачны характар і спатрэбіцца вам пры рашэнні задач. У некаторых параграфах змешчаны дадатковы матэрыял (ён надрукаваны дробным шрыфтам). Гэты матэрыял можна вывучаць па жаданні.

Кожная глава і параграф пачынаюцца з кароткіх уводзін. Асноўныя паняцці і формулы вылучаны ў тэксце. У канцы кожнага параграфа сфармуляваны галоўныя вывады, прыведзены кантрольныя пытанні і практыкаванні. Пастарайцеся адказаць на кожнае пытанне і выканаць усе заданні, каб лепш засвоіць вывучаны матэрыял. Задачы ў практыкаваннях размешчаны згодна з узрастаннем ступені іх складанасці.

У вучэбным дапаможніку вы сустрэнеце наступныя абазначэнні:

✓ — галоўныя вывады;

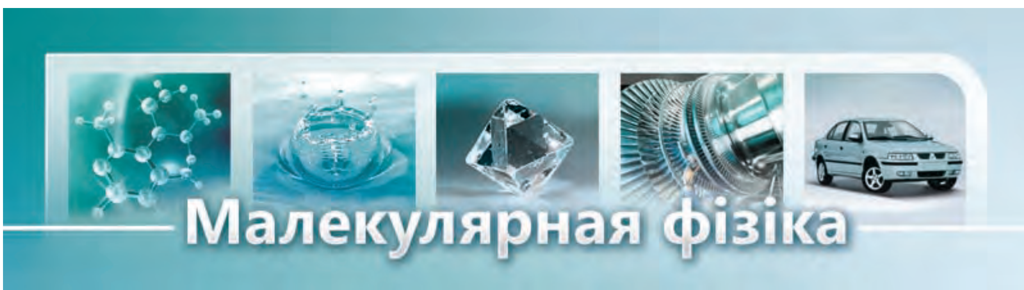
? — кантрольныя пытанні;

! — матэрыял для дапытлівых;

* — найбольш складаныя пытанні і заданні.

Жадаем творчых поспехаў і добрых адзнак!

Аўтары



Малекулярная фізіка — раздзел фізікі, які вывучае ўласцівасці рэчыва (фізічных цел), абумоўленыя рухам і ўзаемадзеяннем часціц (малекул, атамаў, іонаў і інш.), што змяшчаюцца ў рэчыве. На падставе законаў малекулярнай фізікі канструююць цеплавыя рухавікі, установкі для звадкавання газаў, халадзільныя апараты і іншыя тэхнічныя ўстройствы, ствараюць новыя матэрыялы (розныя сплавы, керамікі, пластмасы, гатункі рызіны, шкла, бетону, разнастайныя паўправадніковыя матэрыялы і інш.) з зададзенымі фізічнымі (механічнымі, электрычнымі, магнітнымі, аптычнымі) уласцівасцямі. Найноўшыя адкрыцці ў малекулярнай фізіцы ўплываюць на развіццё хіміі і біялогіі. Напрыклад, малекулярная біялогія, што ўзнікла на стыку навук, тлумачыць з'явы, якія адбываюцца ў жывых арганізмах.

У 9 класе пры вывучэнні механікі вы разглядалі механічную форму руху матэрыі, г. зн. перамяшчэнне цел адносна адно аднаго і іх узаемадзеянне. Пры гэтым унутраная будова таго або іншага цела не мела значэння. Нагадаем, што *фізічным целам* называюць матэрыяльны аб'ект, які мае масу і займае пэўны аб'ём прасторы. Тое, з чаго складаецца фізічнае цела, называюць *рэчывам*. Рэчыва — адзін з відаў *матэрыі*, другім з'яўляецца *поле*. Матэрыя — гэта ўсё, што існуе аб'ектыўна, г. зн. незалежна ад чалавечай свядомасці. Матэрыя існуе ў руху. У фізіцы вывучаюць фізічныя формы руху матэрыі — механічную, цеплавую, электрамагнітную і інш.

У малекулярнай фізіцы разглядаюць з'явы, якія адбываюцца з макраскапічнымі целамі і абумоўлены цеплавой формай руху матэрыі. *Макраскапічнымі целамі (сістэмамі)* у фізіцы называюць целы (сістэмы), якія складаюцца з вялізнай колькасці часціц. Кропля вады, газ у паветраным шары, драўляная дошка, сярэбраная лыжка, наша планета (рыс. 1) — усё гэта макраскапічныя целы.

Для апісання цеплавых з'яў, якія адбываюцца з макраскапічнымі целамі (сістэмамі), неабходны іншыя падыходы і метады, чым тыя, што прымяняюць у механіцы. Рух адной малекулы, які адбываецца ў прасторы, можна

апісаць з выкарыстаннем законаў дынамікі адным вектарным або трыма скалярнымі ўраўненнямі. Аднак прымяніць законы Ньютана да ўсіх малекул, колькасць якіх у любым макраскапічным целе вялізная, нерэальна. Пры выкарыстанні законаў дынамікі для знаходжання характарыстык макраскапічнага цела, напрыклад, паветра ў аб'ёме 1 см^3, спатрэбілася б рашыць прыблізна $8 \cdot 10^{19}$ ураўненняў руху часціц. Макрасістэма — гэта якасна новая сістэма, якая падпарадкоўваецца статыстычным заканамернасцям. Галоўнай асаблівасцю гэтых заканамернасцей з'яўляецца тое, што для іх вызначэння выкарыстоўваюць сярэднія значэнні параметраў сістэмы і асобных яе часціц.

Для апісання макраскапічнай сістэмы, напрыклад, газу ў пасудзіне, можна выкарыстаць два метады — малекулярна-кінетычны (статыстычны) і тэрмадынамічны. Малекулярна-кінетычны метад зыходзіць з пэўных гіпотэз аб унутранай будове рэчыва, а тэрмадынамічны разглядае макраскапічную сістэму ў цэлым, не цікавячыся ўнутранай будовай уваходзячых у яе цел. Пры *малекулярна-кінетычным апісанні* выкарыстоўваюць сярэднія значэнні фізічных велічынь, якія характарызуюць паводзіны часціц, што складаюць сістэму. Напрыклад, сярэднюю кінетычную энергію і сярэднюю скорасць хаатычнага руху часціц. Пры *тэрмадынамічным апісанні* карыстаюцца фізічнымі велічынямі, якія характарызуюць сістэму ў цэлым. Так, апісаць стан пэўнай масы газу ў пасудзіне можна з дапамогай трох параметраў — ціску, аб'ёму і тэмпературы.

У *малекулярна-кінетычнай тэорыі* вывучаюць уласцівасці цел у залежнасці ад іх будовы, ад сіл узаемадзеяння паміж часціцамі (малекуламі, атамамі, іонамі), з якіх складаюцца целы, і характару руху гэтых часціц. *Тэрмадынаміка* вывучае спосабы і формы перадачы энергіі ад аднаго цела да другога, заканамернасці ператварэння адных відаў энергіі ў другія. Такім чынам, статыстычны і тэрмадынамічны метады дапаўняюць адзін аднаго.

Рыс. 1

Глава 1

АСНОВЫ МАЛЕКУЛЯРНА-КІНЕТЫЧНАЙ ТЭОРЫІ

§ 1. Асноўныя палажэнні малекулярна-кінетычнай тэорыі

Што ўяўляе сабой унутраная будова любога рэчыва? Суцэльнае яно або мае дыскрэтную структуру? Чаму ўласцівасці розных рэчываў адрозніваюцца адна ад адной? Ад чаго залежаць тыя ці іншыя ўласцівасці рэчыва?

У аснову малекулярна-кінетычнай тэорыі пакладзены тры палажэнні:

1. Рэчыва мае дыскрэтную будову, г. зн. складаецца з мікраскапічных часціц.

2. Часціцы рэчыва хаатычна рухаюцца.

3. Часціцы рэчыва ўзаемадзейнічаюць паміж сабой.

Дыскрэтная будова рэчыва. Згодна з першым палажэннем малекулярна-кінетычнай тэорыі рэчыва мае дыскрэтную будову, г. зн. складаецца з асобных часціц (малекул, атамаў, іонаў). Пры вывучэнні фізікі ў 6 і 8 класах вы даведаліся, што рэальнае існаванне малекул пацвярджаюць эксперыментальныя факты. Такімі фактамі, у прыватнасці, з'яўляюцца растварэнне рэчываў у вадзе і іншых растваральніках, сцісканне і расшырэнне любых цел і асабліва газаў, механічнае драбленне рэчыва, дыфузія, броўнаўскі рух і многае іншае.

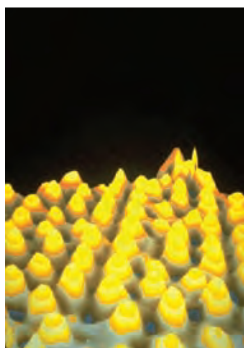
Рыс. 2

Вока можа распазнаць два пункты, калі адлегласць паміж імі не менш чым 0,1 мм. Сучасныя аптычныя мікраскопы дазваляюць адрозніваць структуры з адлегласцю паміж элементамі прыкладна дзвесце нанаметраў і больш (≥ 200 нм), што забяспечвае магчымасць назіраць і фатаграфаваць вельмі вялікія малекулы, якія складаюцца з соцень і нават тысяч атамаў (малекулы некаторых вітамінаў, гармонаў і бялкоў). На рысунку 2 прыведзены

фотаздымак малекулы нуклеінавай кіслаты ніткападобнай формы, агульная даўжыня якой 34 мкм.

Пераход ад светлавых хваль у аптычных мікраскопах да паскораных пучкоў электронаў, рухам якіх кіруюць, выкарыстоўваючы электрычныя і магнітныя палі, у электронных мікраскопах дае магчымасць распазнаць два пункты, калі адлегласць паміж імі складае прыкладна 0,1 нм. Выкарыстанне электронных мікраскопаў дазволіла назіраць і фатаграфаваць атамарныя структуры.

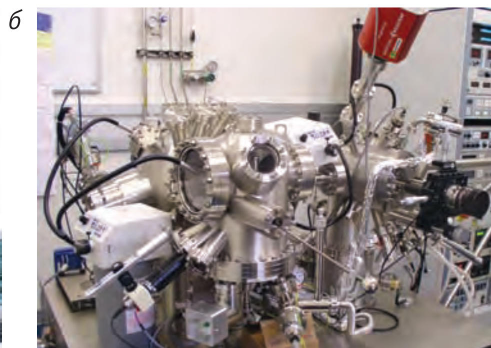
4 сакавіка 1981 г. нямецкі вучоны Герд Бініг і швейцарскі вучоны Генрых Рорар упершыню ў свеце назіралі асобныя атамы на паверхні крэмнію (рыс. 3). На рысунку 4, *а, б* адлюстраваны электронны і тунэльны мікраскопы. За стварэнне першага электроннага мікраскопа нямецкаму вучонаму Эрнсту Руске і за вынаходства скануючага тунэльнага мікраскопа Г. Бінігу і Г. Рорару была прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за 1986 г.



Рыс. 3

а

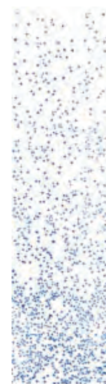
б



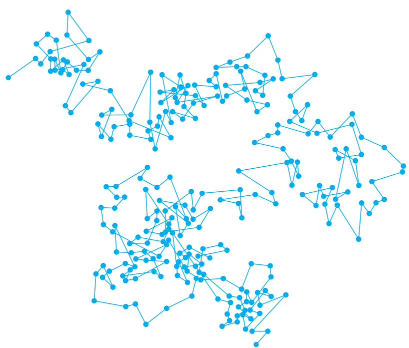
Рыс. 4

Цеплавы рух часціц рэчыва. Згодна з другім палажэннем малекулярна-кінетычнай тэорыі часціцы, што складаюць рэчыва, знаходзяцца ў бесперапынным хаатычным руху, які называюць *цеплавым*.

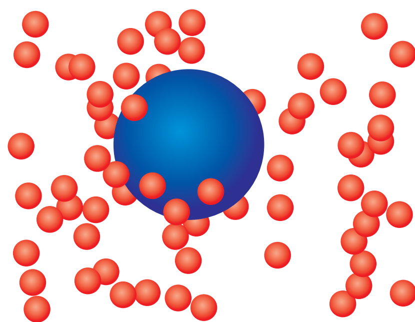
Найбольш яскравым эксперыментальным пацвярджэннем цеплавога руху часціц рэчыва (малекул, атамаў, іонаў) з'яўляецца *броўнаўскі рух,* г. зн. рух «завіслых» у вадкасці або газе найдрабнейшых нерастваральных цвёрдых часціц памерамі прыблізна 1 мкм і менш. «Завіслыя» часціцы — гэта часціцы, шчыльнасць рэчыва якіх блізкая да шчыльнасці навакольнага асяроддзя (вадкасці або газу). Яны размяркоўваюцца па ўсім аб'ёме асяроддзя, не асядаючы на дно пасудзіны і не ўзнімаючыся на яго паверхню (рыс. 5).



Рыс. 5



Рыс. 6



Рыс. 7

Першым звярнуў увагу на дадзеную з'яву ў 1827 г. англійскі батанік Роберт Броўн (1773—1858). Броўнаўскія часціцы рухаюцца бесперапынна і хаатычна, а траекторыі іх руху вельмі складаныя. На рысунку 6 адлюстравана спрошчаная траекторыя руху броўнаўскай часціцы. Пунктамі адзначаны становішчы часціцы праз аднолькавыя прамежкі часу. Траекторыя руху на працягу кожнага прамежку часу заменена адрэзкам прамой, які ўяўляе сабой модуль выніковага перамяшчэння часціц.

Броўнаўскі рух абумоўлены ўласцівасцямі вадкасці або газу, не залежыць ад прыроды рэчыва броўнаўскай часціцы і знешніх уздзеянняў (акрамя тэмпературы). Прычынай броўнаўскага руху з'яўляецца цеплавы рух часціц асяроддзя, у якім знаходзіцца броўнаўская часціца, і адсутнасць дакладнай кампенсацыі ўдараў, якія зведвае часціца з боку малекул (атамаў або іонаў), што яе акружаюць (рыс. 7). Чым меншыя памеры і маса броўнаўскай часціцы, тым лягчэй заўважыць змяненні яе імпульсу пад уздзеяннем удараў. Інтэнсіўнасць руху броўнаўскіх часціц узрастае з павышэннем тэмпературы і памяншэннем вязкасці асяроддзя, г. зн. унутранага трэння, якое яно аказвае. Броўнаўскі рух ледзь прыкметны ў гліцэрыне, а ў газах ён, наадварот, вельмі інтэнсіўны.

Першую колькасную тэорыю броўнаўскага руху прапанаваў у 1905 г. Альберт Эйнштэйн (1879—1955). Польскі фізік Марыян Смалухоўскі (1872—1917) у 1906 г. таксама распрацаваў колькасную тэорыю броўнаўскага руху. Эксперыментальнае пацвярджэнне прапанаванай тэорыі з'явілася заслугай французскага фізіка Жана Пярэна (1870—1942). «За доказ існавання малекул» Ж. Пярэну прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за 1926 г. Броўнаўскі рух сведчыць аб тым, што малекулы сапраўды існуюць і што яны бесперапынна і хаатычна рухаюцца.

Пацвярджэннем цеплавога руху часціц рэчыва з'яўляецца таксама *дыфузія* — працэс выраўноўвання канцэнтрацый неаднародна размеркаваных у прасторы атамаў, малекул або іонаў рэчыва. Канцэнтрацыя — велічыня, роўная адносіне колькасці N часціц да аб'ёму V, які яны займаюць: $n = \frac{N}{V}$.

Калі ў розных частках аднаго і таго ж цела ў аб'ёмах V_i і V_j канцэнтрацыі $n_i = \frac{N_i}{V_i}$ і $n_j = \frac{N_j}{V_j}$ часціц не супадаюць, то ў выніку іх цеплавога руху адбываецца ўпарадкаванае перамяшчэнне, якое вядзе да выраўноўвання канцэнтрацый пры пастаяннай тэмпературы і адсутнасці знешніх сіл. Калі тэмпература непастаянная або на сістэму дзейнічаюць знешнія сілы, то ў выніку дыфузіі ўсталёўваецца прасторава неаднароднае раўнаважнае размеркаванне канцэнтрацый часціц.

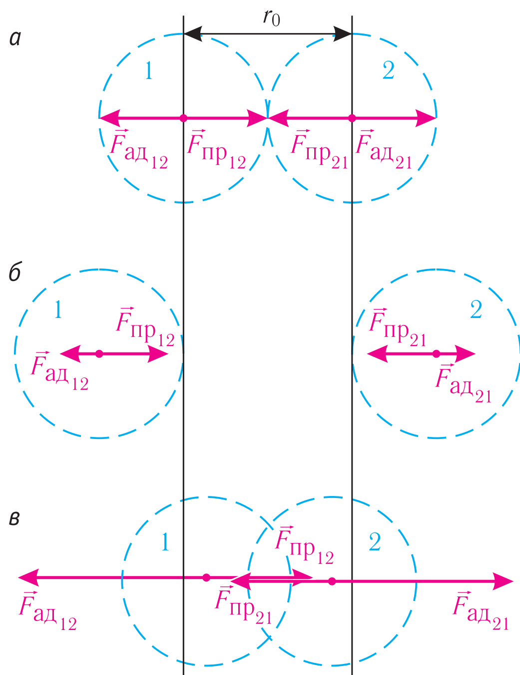
Скорасць дыфузіі залежыць ад характару руху часціц рэчыва, які вызначаецца тэмпературай і асабліва агрэгатным станам. У газах дыфузія адбываецца хутчэй, чым у вадкасцях, а тым больш у цвёрдых целах. Дыфузія мае важнае значэнне ў прыродзе і тэхніцы. Дзякуючы дыфузіі ажыццяўляецца сілкаванне раслін неабходнымі рэчывамі з глебы, у жывых арганізмах ідзе ўсмоктванне пажыўных рэчываў праз сценкі сасудаў стрававальнага тракту. Для павелічэння цвёрдасці стальных дэталей іх паверхневы слой дыфузна насычаюць вугляродам. Дыфузія выкарыстоўваецца ў ядзерных тэхналогіях як адзін са спосабаў абагачэння ўрану.

Узаемадзеянне часціц рэчыва. Сам факт існавання цвёрдых і вадкіх цел сведчыць аб тым, што паміж часціцамі рэчываў, якія ўтвараюць гэтыя целы, дзейнічаюць *сілы ўзаемнага прыцяжэння*. Часціцы (атамы або малекулы) у гэтых целах утрымліваюцца разам менавіта сіламі ўзаемнага прыцяжэння. З паўсядзённага вопыту вядома, што гэтыя сілы найбольш наглядна праяўляюцца ў цвёрдых целах. Тонкі стальны трос дыяметрам 2 мм дастаткова трывалы, каб на ім падняць груз масай 100 кг. Тое, што газы займаюць увесь дадзены ім аб'ём, гаворыць пра зусім нязначнае праяўленне сіл узаемнага прыцяжэння паміж іх малекуламі*. Усярэдненая адлегласць паміж малекуламі газаў істотна перавышае памеры саміх малекул, а таксама адлегласці паміж

* Нягледзячы на тое, што не ўсе газы і вадкасці складаюцца з малекул (яны могуць складацца і з атамаў, і з іонаў), далей, гаворачы аб газах і вадкасцях, мы будзем выкарыстоўваць тэрмін «малекула».

часціцамі, з якіх складаюцца вадкасці і цвёрдыя целы. Такая розніца ў праяўленні сіл узаемнага прыцяжэння паміж часціцамі цвёрдых цел і вадкасцей, з аднаго боку, і часціцамі газаў — з другога магчыма толькі ў тым выпадку, калі модуль сіл узаемнага прыцяжэння паміж часціцамі хутка змяншаецца з узрастаннем адлегласці паміж іх цэнтрамі. Пры гэтым кінетычная энергія $E_к$ цеплавога руху малекул газаў намнога перавышае модуль патэнцыяльнай энергіі $|E_п|$ іх узаемадзеяння: $E_к >> |E_п|$.

Адносна малая сціскальнасць вадкасцей і цвёрдых цел сведчыць пра тое, што паміж малекуламі рэчыва існуюць і сілы ўзаемнага адштурхвання. Сілы прыцяжэння і сілы адштурхвання дзейнічаюць адначасова. У адваротным выпадку ўстойлівых станаў вялікіх сукупнасцей малекул не магло б існаваць: часціцы рэчыва сцягваліся б у адно месца або разляталіся ў розныя бакі. Залежнасць модулей сіл узаемнага прыцяжэння і ўзаемнага адштурхвання ад адлегласці паміж цэнтрамі часціц павінна быць рознай. Акрамя таго, павінна існаваць пэўная адлегласць r_0 паміж цэнтрамі часціц, пры якой сілы прыцяжэння ўраўнаважваюцца сіламі адштурхвання — іх раўнадзейная роўная нулю (рыс. 8, *а*). Адлегласць r_0 называюць *раўнаважнай*.



Рыс. 8

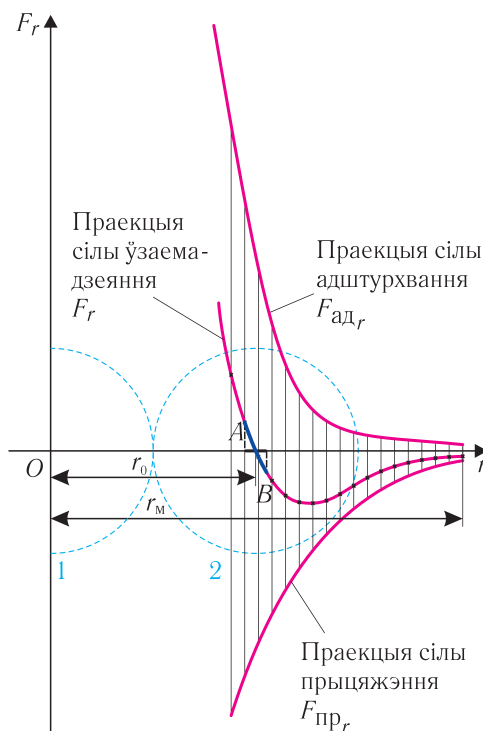
Разгледзім узаемадзеянне электрычна нейтральных часціц — атамаў і малекул. У 8 класе вы даведаліся, што пераразмеркаванне зараду ў целе, выклікане ўздзеяннем іншага зараджанага цела, называюць электрызацыяй праз уплыў. Калі адлегласць паміж цэнтрамі малекул перавышае іх памеры (рыс. 8, *б*), то адбываецца своеасаблівая «электрызацыя» гэтых малекул праз уплыў. Каб зразумець, чаму гэта адбываецца, трэба ўлічыць наступнае. Па-першае, пратоны і электроны, якія маюць зарады супрацьлеглых знакаў, унутры часціцы не знаходзяцца ў адным пункце, таму паблізу

любога атама або малекулы існуе электрычнае поле. Па-другое, пад уздзеяннем гэтага поля становішча і рух зараджаных часціц унутры суседніх малекул крыху змяняецца такім чынам, што ядры, якія змяшчаюць пратоны, зрушваюцца ў напрамку знешняга электрычнага поля, а электроны — у супрацьлеглы бок. Гэта з'ява атрымала назву электрычнай палярызацыі. Электрычнае поле, створанае палярызацыйнымі зарадамі малекулы *2*, у сваю чаргу, выклікае пераразмеркаванне ядзер, якія змяшчаюць пратоны, і электронаў у малекуле *1*. У выніку малекулы будуць звернуты адна да адной супрацьлегла заражанымі часткамі, што і забяспечвае іх узаемнае прыцяжэнне.

Згодна з тэарэтычнымі і эксперыментальнымі даследаваннямі на блізкіх адлегласцях, калі электронныя абалонкі ўзаемадзеючых малекул перакрываюцца (рыс. 8, *в*), сілы малекулярнага адштурхвання пераважаюць над сіламі прыцяжэння. Модуль сіл адштурхвання вельмі вялікі пры малых адлегласцях паміж цэнтрамі ўзаемадзеючых малекул, але хутка змяншаецца з павелічэннем адлегласці. Узаемнаму перакрыццю электронных абалонак перашкаджае ўзаемнае адштурхванне электронаў.

! Модуль сіл міжмалекулярнага ўзаемадзеяння адваротна прапарцыянальны *n*-ай ступені адлегласці паміж цэнтрамі малекул $F \sim \frac{1}{r^n}$, дзе для сіл прыцяжэння $n = 7$, а для сіл адштурхвання $n = 13$.

Залежнасць праекцыі раўнадзейнай F_r сіл прыцяжэння і адштурхвання дзвюх суседніх малекул ад адлегласці r паміж іх цэнтрамі можна паказаць графічна. Накіруем вось Or ад малекулы *1*, цэнтр якой супадае з пачаткам каардынат, да цэнтра малекулы *2*, адлегласць да якога r можа змяняцца (рыс. 9). Будзем лічыць, што малекула *1* умоўна нерухомая, а малекула *2* змяняе сваё становішча адносна малекулы *1*. Тады праекцыя сілы адштурхвання



Рыс. 9

малекулы *2* ад малекулы *1* на вось Or будзе дадатнай, а праекцыя сілы прыцяжэння малекулы *2* да малекулы *1* — адмоўнай.

На малых адлегласцях ($r < r_0$) модуль сілы адштурхвання (гл. рыс. 9) больш за модуль сілы прыцяжэння, але з павелічэннем адлегласці r ён змяншаецца хутчэй, чым модуль сілы прыцяжэння. Пачынаючы з некаторай адлегласці $r_м$ узаемадзеянне малекул можна не прымаць пад увагу. Найбольшую адлегласць $r_м$, на якой яшчэ ўлічваюць узаемадзеянне малекул, называюць *радыусам малекулярнага дзеяння*. Адлегласць r_0 адпавядае ўстойліваму (раўнаважнаму) узаемнаму становішчу малекул. Тонкія «вертыкальныя» (паралельныя F_r) лініі праведзены пры выкананні складання праекцый сіл.

Графік залежнасці праекцыі раўнадзейнай F_r сіл прыцяжэння і адштурхвання дзвюх суседніх малекул ад адлегласці r паміж іх цэнтрамі (крывая праекцыі сілы ўзаемадзеяння F_r на рысунку 9) дазваляе растлумачыць малекулярны механізм узнікнення сіл пругкасці ў цвёрдых целах. Пры ўздзеянні на цела расцяжных знешніх сіл адлегласць r паміж цэнтрамі часціц рэчыва становіцца большай за раўнаважную адлегласць r_0. Модуль сілы прыцяжэння на адлегласцях $r > r_0$ перавышае модуль сілы адштурхвання (гл. рыс. 9). Дзеянне сіл прыцяжэння паміж часціцамі вяртае іх у першапачатковыя становішчы пасля спынення знешняга ўздзеяння. Пры сцісканні цвёрдага цела яго часціцы збліжаюцца на адлегласць $r < r_0$. Цяпер сілы адштурхвання пераважаюць і перашкаджаюць далейшаму сцісканню. Пры малых зрушэннях часціц з першапачатковых становішчаў устойлівай раўнавагі, выкліканых дэфармацыяй цвёрдага цела, залежнасць праекцыі выніковай сілы F_r ад адлегласці практычна лінейная (участак *AB* крывой F_r графіка на рысунку 9 можна лічыць адрэзкам прамой).

1. У аснову малекулярна-кінетычнай тэорыі пакладзены тры палажэнні:

1) Рэчыва мае дыскрэтны стан, г. зн. складаецца з мікраскапічных часціц.

2) Часціцы рэчыва хаатычна рухаюцца.

3) Часціцы рэчыва ўзаемадзейнічаюць паміж сабой.

2. Сілы ўзаемадзеяння паміж часціцамі рэчыва маюць электрамагнітнае паходжанне і вельмі хутка змяншаюцца з павелічэннем адлегласці паміж часціцамі.

1. Пералічыце асноўныя палажэнні малекулярна-кінетычнай тэорыі. Якія навуковыя факты і эксперыменты іх пацвярджаюць?

2. Чаму броўнаўскі рух можна заўважыць толькі ў часціц з малымі памерамі і масай?

3. Якое паходжанне сіл міжмалекулярнага ўзаемадзеяння?

4. Якія сілы (прыцяжэння або адштурхвання) будуць пераважаць, калі пад уздзеяннем знешніх сіл адлегласць паміж часціцамі рэчыва стане: а) менш за раўнаважную; б) больш за раўнаважную? Што адбудзецца ў кожным з гэтых выпадкаў пасля спынення дзеяння знешніх сіл?

5. Калі змяшаць два роўныя аб'ёмы вады і спірту, то агульны аб'ём вадкасцей будзе меншы, чым сума аб'ёмаў вады і спірту. Калі ў пасудзіну, у якую наліты некаторы аб'ём вады, дадаць такі ж аб'ём ртуці, то агульны аб'ём вадкасцей будзе роўны суме аб'ёмаў вады і ртуці. Як можна растлумачыць розніцу?

6. Чаму добра прыцёрты шкляны корак цяжка выцягнуць з горлачка шклянога флакона?

§ 2. Маса і памеры малекул. Колькасць рэчыва

1,0 см^3 *любога газу, які знаходзіцца пры нармальных умовах (тэмпература* $t_0 = 0{,}0\ ^\circ\text{C}$*, ціск* $p_0 = 1{,}0 \cdot 10^5$ Па*), змяшчае* $2{,}7 \cdot 10^{19}$ *малекул. Наколькі вялікая гэта колькасць, паказвае наступны прыклад. Уявім, што з адтуліны ў ампуле ўмяшчальнасцю* $V = 1{,}0$ см^3 *штосекундна вылятае сто малекул. Тады для таго, каб усе малекулы вылецелі з ампулы, спатрэбіцца 8,6 мільярда гадоў, г. зн. прамежак часу, параўнальны з узростам сусвету (12—15 млрд гадоў). Такая вялізная колькасць малекул у рэчыве сведчыць пра тое, што іх памеры вельмі малыя. Якія ж памеры і маса часціц рэчыва? Як іх можна вызначыць?*

Малекулярна-кінетычная тэорыя дала магчымасць ацаніць масу і памеры часціц, што ўтвараюць макраскапічныя целы. Малекулы, як і атамы, не маюць дакладных меж. Калі ўявіць малекулу ў выглядзе шарыка, то яе радыус мае значэнне ад 0,1 нм у самых простых да 100 нм у складаных малекул, якія змяшчаюць некалькі тысяч атамаў. Напрыклад, ацэначны дыяметр малекулы вадароду складае 0,2 нм, а малекулы вады — 0,3 нм. Пры такіх памерах колькасць часціц у рэчыве вельмі вялікая. Напрыклад, у адным граме вады змяшчаецца $3{,}3 \cdot 10^{22}$ малекул.

Памеры і маса малекулы ўзрастаюць з павелічэннем колькасці атамаў, што ўваходзяць у яе склад. Атамы і малекулы (акрамя шмататамных малекул арганічных рэчываў) маюць масу прыкладна 10^{-26} кг. З прычыны малых значэнняў выражаць масы атамаў і малекул у кілаграмах (кг) нязручна. Таму для вымярэння мас малекул у хіміі і фізіцы выкарыстоўваюць атамную адзінку масы (а. а. м.). Атамную адзінку масы выражаюць праз масу ізатопу вугляроду $^{12}_{6}\mathrm{C}$:

$$1 \text{ а. а. м.} = \frac{1}{12} m_{0\mathrm{C}} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Масу малекулы (атама), выражаную ў атамных адзінках масы, называюць адноснай малекулярнай (атамнай) масай і абазначаюць сімвалам M_r. Адносная малекулярная (атамная) маса M_r паказвае, у колькі разоў маса малекулы (атама) большая за атамную адзінку масы:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0\mathrm{C}}}.$$

Колькасць рэчыва ν вызначаюць адносінай колькасці N часціц гэтага рэчыва да пастаяннай Авагадра N_A:

$$\boldsymbol{\nu = \frac{N}{N_\mathrm{A}}}.$$

Асноўнай адзінкай колькасці рэчыва ў СІ з'яўляецца моль (моль). *Адзін моль* роўны колькасці рэчыва, якое змяшчае столькі ж часціц, колькі атамаў утрымліваецца ў 0,012 кг ізатопу вугляроду $^{12}_{6}\mathrm{C}$. У адным молі любога рэчыва знаходзіцца аднолькавая колькасць атамаў або малекул, якая ў гонар італьянскага вучонага Амедэа Авагадра (1776—1856) атрымала назву *пастаянная Авагадра* (N_A). Гэта велічыня з'яўляецца адной з фундаментальных фізічных пастаянных, яе значэнне

$$N_\mathrm{A} = 6{,}022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

У малекулярна-кінетычнай тэорыі разам з адноснай малекулярнай (атамнай) масай M_r выкарыстоўваюць малярную масу M.

Малярная маса — маса рэчыва, узятага ў колькасці $\nu = 1$ моль. Малярную масу M вызначаюць адносінай масы m рэчыва да яго колькасці ν:

$$\boldsymbol{M = \frac{m}{\nu}}.$$

Асноўнай адзінкай малярнай масы ў СІ з'яўляецца кілаграм на моль $\left(\frac{\text{кг}}{\text{моль}}\right)$. Малярная маса рэчыва звязана з яго адноснай малекулярнай (атамнай) масай наступнай суадносінай:

$$M = M_r \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Пры рашэнні задач адносную атамную масу вызначаюць, карыстаючыся перыядычнай сістэмай хімічных элементаў. У большасці выпадкаў значэнне адноснай атамнай масы акругляюць да цэлага ліку. Так, адносная атамная маса вадароду роўная 1, кіслароду — 16, азоту — 14.

Малярную масу M рэчыва можна вылічыць, памножыўшы масу адной малекулы m_0 на колькасць малекул у адным молі (пастаянная Авагадра N_A):

$$M = m_0 N_\text{A}.$$

З улікам таго, што $m_0 = \frac{M}{N_\text{A}}$, атрымаем формулу для разліку колькасці N малекул у дадзеным рэчыве:

$$N = \frac{m}{m_0} = \frac{m}{M} N_\text{A} = \nu N_\text{A},$$

дзе m — маса рэчыва, ν — колькасць рэчыва (колькасць моляў). Выкарыстаўшы дадзеную формулу, можна разлічыць колькасць малекул у адным граме вады. Зрабіце гэта самастойна і пераканайцеся ў правільнасці значэння, прыведзенага ў пачатку параграфа.

1. Адзін моль — колькасць рэчыва, у якім змяшчаецца столькі ж часціц (атамаў, малекул або іонаў), колькі атамаў знаходзіцца ў 0,012 кг ізатопу вугляроду $^{12}_{6}\text{C}$.

2. Пастаянная Авагадра — фундаментальная фізічная пастаянная, роўная колькасці часціц у адным молі любога рэчыва: $N_\text{A} = 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}$.

3. Колькасць рэчыва (колькасць моляў) вызначаюць адносінай колькасці часціц гэтага рэчыва да пастаяннай Авагадра: $\nu = \frac{N}{N_\text{A}}$.

4. Малярную масу вызначаюць адносінай масы рэчыва да колькасці рэчыва: $M = \frac{m}{\nu}$.

5. Масу малекулы рэчыва можна вылічыць па формуле $m_0 = \frac{M}{N_A}$.

?

1. У якіх адзінках вымяраюць масы атамаў і малекул?

2. Што такое колькасць рэчыва? У якіх адзінках вымяраюць гэту фізічную велічыню?

3. Што паказвае пастаянная Авагадра?

4. Што называюць малярнай масай рэчыва?

5. Як, ведаючы адносную малекулярную (атамную) масу рэчыва, вызначыць яго малярную масу?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Вызначце малярную масу і масу адной малекулы сульфату медзі(II) $CuSO_4$.

Рашэнне. Каб вылічыць малярную масу M любога рэчыва, неабходна па хімічнай формуле знайсці адносную малекулярную масу M_r гэтага рэчыва і атрыманае значэнне памножыць на $10^{-3}\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$. Паколькі хімічная формула сульфату медзі(II) мае выгляд $CuSO_4$, то $M_r = 64 + 32 + 16 \cdot 4 = 1{,}6 \cdot 10^2$.

Тады малярная маса $M = 1{,}6 \cdot 10^2 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 0{,}16\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

Для вызначэння масы малекулы $CuSO_4$ выкарыстаем формулу $m_0 = \frac{M}{N_A}$*:

$$m_0 = \frac{0{,}16\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}} = 0{,}027 \cdot 10^{-23}\ \text{кг} = 2{,}7 \cdot 10^{-25}\ \text{кг}.$$

Адказ: $M = 0{,}16\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$, $m_0 = 2{,}7 \cdot 10^{-25}$ кг.

---

* Пры рашэнні задач пастаянную Авагадра лічыць роўнай $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

Прыклад 2. Вызначце колькасць рэчыва ў жалезным бруску аб'ёмам $V = 100$ см^3. Чаму роўная колькасць атамаў жалеза ў бруску? Шчыльнасць жалеза $\rho = 7{,}8 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Дадзена:
$V = 100$ см$^3 = 1{,}00 \cdot 10^{-4}$ м^3
$\rho = 7{,}8 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

ν — ?
N — ?

Рашэнне. Колькасць рэчыва можна вызначыць па формуле $\nu = \frac{m}{M}$, дзе m — маса жалезнага бруска, а $M = 56 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ — малярная маса жалеза. Паколькі $m = \rho V$, то $\nu = \frac{\rho V}{M}$.

$$\nu = \frac{7{,}8 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 1{,}00 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^3}{56 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} = 14\ \text{моль}.$$

Колькасць атамаў у дадзеным жалезным бруску $N = \nu N_A$.

$$N = 14\ \text{моль} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1} = 8{,}4 \cdot 10^{24}.$$

Адказ: $\nu = 14$ моль, $N = 8{,}4 \cdot 10^{24}$.

Практыкаванне 1

1. Карыстаючыся перыядычнай сістэмай хімічных элементаў, вызначце малярныя масы вады H_2O, вуглякіслага газу CO_2, аміяку NH_3, азотнай кіслаты HNO_3. Вызначце масы малекул гэтых рэчываў.

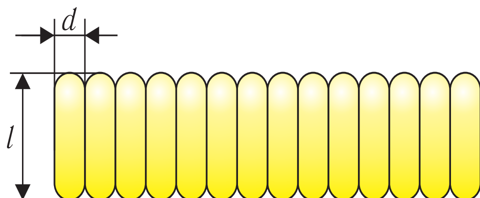
2. У шклянку наліта вада H_2O масай $m = 0{,}20$ кг. Вызначце колькасць рэчыва і колькасць малекул вады ў шклянцы.

3. Вызначце масу $N = 4{,}5 \cdot 10^{22}$ малекул серавадароду H_2S.

4. Параўнайце колькасць часціц рэчыва ў алюмініевым і медным кубіках аднолькавага аб'ёму. Шчыльнасць алюмінію $\rho_а = 2{,}7 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, шчыльнасць медзі $\rho_м = 8{,}9 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

5. У сярэбранай пласцінцы $N = 1{,}0 \cdot 10^{24}$ атамаў. Вызначце аб'ём пласцінкі, калі шчыльнасць серабра $\rho = 1{,}05 \cdot 10^4\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

6*. Англійскі фізік Джон Уільям Стрэт, лорд Рэлей (1842—1919) прапанаваў такі спосаб ацэнкі памераў малекул: на паверхню вады ў шырокай пасудзіне ён капнуў кроплю аліўкавага алею аб'ёмам $V = 8{,}9 \cdot 10^{-10}$ м^3 і шчыльнасцю $\rho = 9{,}0 \cdot 10^2\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Кропля расцяклася, утварыўшы плёнку плошчай $S = 0{,}55$ м^2. Вызначце па гэтых даных масу і памеры малекулы аліўкавага алею, палічыўшы таўшчыню плёнкі роўнай даўжыні цыліндрычных па форме малекул алею (рыс. 10). Малярную масу аліўкавага алею палічыце роўнай $M = 0{,}28\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.



Рыс. 10

7. Вада ў адкрытай пасудзіне выпарылася за прамежак часу $t = 6{,}0$ сутак. Вызначце масу вады, якая знаходзілася ў пасудзіне, калі з яе паверхні кожную секунду вылятала $\langle N_1 \rangle = 5{,}0 \cdot 10^{18}$ малекул.

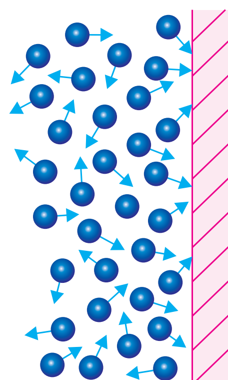
8*. У пасудзіну з вадой кінулі крышталік паваранай солі NaCl масай $m = 2{,}0$ мг. Праз некаторы прамежак часу соль, растварыўшыся, раўнамерна размеркавалася па ўсім аб'ёме вады так, што ў кожным кубічным міліметры раствору аказалася $N_1 = 6{,}0 \cdot 10^{12}$ іонаў натрыю. Вызначце аб'ём вады ў пасудзіне.

9*. Кропелька духоў, якая змяшчае араматычнае рэчыва масай $m = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ г, выпарылася ў пакоі ўмяшчальнасцю $V_1 = 40$ м^3. Малярная маса араматычнага рэчыва $M = 50\ \frac{\text{г}}{\text{моль}}$. Вызначце сярэднюю колькасць малекул гэтага рэчыва, якія трапляюць пры кожным удыху ў лёгкія чалавека, калі аб'ём удыхаемага паветра $V_2 = 2{,}2$ л.

§ 3. Макра- і мікрапараметры. Ідэальны газ. Асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу

Найбольш простым з усіх агрэгатных станаў рэчыва з'яўляецца газападобны. Таму вывучэнне ўласцівасцей рэчываў пачынаюць з газаў. Газ (грэч. chaos — хаос) — такі агрэгатны стан рэчыва, калі часціцы,

што яго складаюць, амаль свабодна і хаатычна рухаюцца паміж сутыкненнямі, у час якіх адбываецца рэзкая змена іх скорасці. Тэрмін “газ” прапанаваў у пачатку XVII ст. нідэрландскі хімік Ян Батыст ван Гельмант (1579—1644). З фізікі 7 класа вы ведаеце, што ціск газу на сценкі пасудзіны, у якой ён знаходзіцца, як і на любое цела, змешчанае ўнутры пасудзіны, узнікае ў выніку ўдараў часціц, што ўтвараюць газ (рыс. 11). Дзякуючы хаатычнасці іх руху ўсярэднены па часе ціск газу ва ўсіх пунктах пасудзіны аднолькавы. У агульным выпадку ціск — фізічная скалярная велічыня, роўная адносіне модуля сілы ціску, якая дзейнічае на плоскую паверхню, да плошчы гэтай паверхні: $p = \frac{F_ц}{S}$. *У СІ асноўнай адзінкай ціску з’яўляецца паскаль (Па).*



Рыс. 11

Макра- і мікрапараметры. У 9 класе пры вывучэнні механікі вы пазнаёміліся з паняццем “стан механічнай сістэмы цел” і параметрамі гэтага стану — каардынатамі, скарасцямі і імпульсамі. У цеплавых працэсах асноўнымі фізічнымі велічынямі, якія характарызуюць некаторую колькасць газу як макраскапічную сістэму, з’яўляюцца ціск p, аб’ём V і тэмпература T. Гэтыя фізічныя велічыні называюць *макраскапічнымі параметрамі* стану газу. Да *мікраскапічных параметраў* стану газу адносяць індывідуальныя характарыстыкі малекул: масу асобнай малекулы m_0, а таксама скорасць $\vec{v}$, імпульс $\vec{p}$ і кінетычную энергію $E_к$ яе цеплавога руху. Заўважым, што гаворка ідзе пра сярэднія значэнні як макра-, так і мікраскапічных параметраў.

Адна з галоўных задач малекулярна-кінетычнай тэорыі заключаецца ва ўстанаўленні сувязі паміж макраскапічнымі і мікраскапічнымі параметрамі.

Ідэальны газ. Для тэарэтычнага тлумачэння ўласцівасцей газаў выкарыстоўваюць іх спрошчаную мадэль. Ідэальны газ — мадэль газу, якая адпавядае наступным умовам: 1) малекулы газу можна лічыць матэрыяльнымі пунктамі, якія хаатычна рухаюцца; 2) сілы ўзаемадзеяння паміж малекуламі ідэальнага газу практычна адсутнічаюць (патэнцыяльная энергія ўзаемадзеяння роўная нулю); яны дзейнічаюць толькі пры сутыкненнях малекул, прычым гэта сілы адштурхвання. Паводзіны малекул ідэальнага газу можна апісаць, выкарыстаўшы законы Ньютана. Паміж сутыкненнямі малекулы рухаюцца практычна раўнамерна і прамалінейна.

Для рэальных газаў мадэль ідэальнага газу можна прымяняць у абмежаваным як знізу, так і зверху дыяпазоне тэмператур і пры дастаткова малых цісках. Так, уласцівасці вадароду і гелію пры нармальным атмасферным ціску і пакаёвай тэмпературы блізкія да ўласцівасцей ідэальнага газу.

Вядома, ні адна мадэль, у тым ліку і мадэль ідэальнага газу, не ў стане апісаць усе ўласцівасці сістэмы. Аднак выкарыстанне мадэлі ідэальнага газу істотна спрашчае задачу знаходжання колькасных суадносін паміж макраскапічнымі і мікраскапічнымі параметрамі газу.

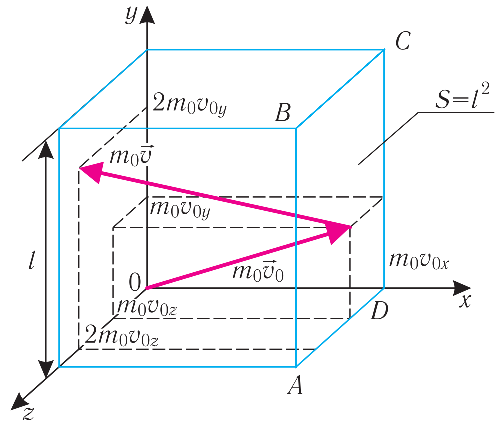
Ціск газу ў малекулярна-кінетычнай тэорыі. З пункта гледжання малекулярна-кінетычнай тэорыі ціск газу ўзнікае ў выніку ўдараў малекул, якія ўтвараюць газ, па целе, што судакранаецца з ім. Пры ўдары імпульс малекулы газу змяняецца: $\Delta\vec{p} = m_0\vec{v} - m_0\vec{v}_0$, дзе m_0 — яе маса, а $\vec{v}_0$ і $\vec{v}$ — скорасці перад ударам і пасля яго. Калі Δt — прамежак часу паміж двума паслядоўнымі ўдарамі адной і той жа малекулы аб цела, то сярэдняй сіле $\left\langle \vec{F}_{\text{м}} \right\rangle$, з якой цела дзейнічае на малекулу ў час удару працягласцю δt, адпавядае сярэдняя сіла $\left\langle \vec{F}_{1\text{сц}} \right\rangle$, з якой адна малекула дзейнічае на цела (напрыклад, сценку пасудзіны) на працягу прамежку часу Δt. Выкарыстаўшы другі закон Ньютана для апісання ўдару малекулы $\left\langle \vec{F}_{\text{м}} \right\rangle \delta t = m_0\vec{v} - m_0\vec{v}_0$ і трэці закон Ньютана для імгненных значэнняў сіл узаемадзеяння малекулы і цела $\vec{F}_{\text{м}} = -\vec{F}_{1\text{сц}}$, атрымаем:

$$\left\langle \vec{F}_{\text{м}} \right\rangle \delta t = m_0\vec{v} - m_0\vec{v}_0 = -\left\langle \vec{F}_{1\text{сц}} \right\rangle \Delta t. \quad (3.1)$$

Пры нармальных умовах і макраскапічных памерах пасудзіны колькасць удараў малекул газу аб плоскую паверхню плошчай 1 см^2 складае прыкладна 10^{24} у секунду. Вельмі слабыя сілы ўдараў асобных малекул $\left\langle \vec{F}_{1\text{сц}} \right\rangle$ складваюцца для вялізнай колькасці малекул у значную па велічыні і амаль пастаянную сілу, што дзейнічае на цела. Усярэдненае па часе значэнне гэтай сілы, аднесенае да паверхні адзінкавай плошчы, і ёсць ціск газу.

Няхай у пасудзіне, што мае форму куба з кантам даўжынёй l (рыс. 12), знаходзіцца ідэальны газ, які складаецца з аднолькавых малекул масай m_0 кожная. Будзем лічыць, што малекулы пругка ўдараюцца толькі аб сценкі пасудзіны, не сутыкаючыся адна з адной. Паколькі малекулы, якія ўтвараюць сценкі пасудзіны, выконваюць цеплавыя ваганні, то скорасці руху малекул газу пры сутыкненнях з імі змяняюцца выпадковым чынам. Аднак калі газ і пасудзіна знаходзяцца ў цеплавой раўнавазе, то сярэдняя кінетычная энергія малекул не

змяняецца з часам. Гэта дазваляе рэальны хаатычны рух малекул газу з усемагчымымі напрамкамі і модулямі скарасцей спрошчана разглядаць як рух, пры якім модулі праекцый скарасцей на кожную з каардынатных восей аднолькавыя, г. зн. $|v_x| = |v_y| = |v_z|$, і застаюцца нязменнымі, а пры сутыкненнях змяняецца знак толькі ў адной з трох праекцый скорасці на каардынатныя восі.



Рыс. 12

Для апісання ўдару малекулы газу аб сценку *ABCD* (гл. рыс. 12) запішам суадносіну (3.1) у праекцыях на каардынатныя восі:

$$\langle F_{\text{м}x}\rangle \delta t = \Delta p_x = m_0v_x - m_0v_{0x} = m_0v_x - (-m_0v_x) = 2m_0v_x = -2m_0v_{0x} = -\langle F_{1\text{сц}x}\rangle \Delta t;$$

$$\langle F_{\text{м}y}\rangle \delta t = \Delta p_y = m_0v_y - m_0v_{0y} = 0; \quad \langle F_{\text{м}z}\rangle \delta t = \Delta p_z = m_0v_z - m_0v_{0z} = 0.$$

Паколькі прамежак часу паміж двума паслядоўнымі сутыкненнямі малекулы са сценкай *ABCD* $\Delta t = \frac{2l}{v_{0x}}$, то

$$\langle F_{1\text{сц}x}\rangle = -\frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2m_0v_{0x}}{\Delta t} = \frac{2m_0v_{0x}^2}{2l} = \frac{m_0v_{0x}^2}{l}.$$

Праекцыя поўнай сярэдняй сілы, з якой усе N малекул, што знаходзяцца ў пасудзіне, дзейнічаюць на сценку *ABCD* $\langle F_{\text{сц}}\rangle = \langle F_{1\text{сц}x}\rangle \cdot N$, паколькі $\langle F_{1\text{сц}y}\rangle = 0$ і $\langle F_{1\text{сц}z}\rangle = 0$.

Значыць, $\langle F_{\text{сц}}\rangle = N\frac{m_0\langle v_x^2\rangle}{l}$, дзе $\langle v_x^2\rangle$ — усярэднены па ўсіх N часціцах квадрат праекцый іх скарасцей на вось Ox.

Раздзяліўшы абедзве часткі суадносіны для $\langle F_{\text{сц}}\rangle$ на плошчу сценкі $S = l^2$, атрымаем формулу для вызначэння ціску, які малекулы газу аказваюць на сценку *ABCD*:

$$p = \frac{Nm_0\langle v_x^2\rangle}{l^3}.$$

Паколькі $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$, то $\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$. Малекулы газу зусім аднолькава адбіваюцца ад трох пар супрацьлегла размешчаных граней куба, таму $\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle = \frac{1}{3}\langle v^2 \rangle$. З улікам таго, што газ займае аб'ём $V = l^3$, а канцэнтрацыя малекул газу $n = \frac{N}{V}$, атрымаем:

$$\boldsymbol{p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle.} \qquad (3.2)$$

Ураўненне (3.2) называюць *асноўным ураўненнем малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу*. Гэта ўраўненне дазваляе разлічыць макраскапічны параметр ціск p газу праз канцэнтрацыю n малекул, масу m_0 малекулы і сярэднюю квадратычную скорасць яе цеплавога руху, якая вызначаецца па формуле $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$. Інакш кажучы, формула (3.2) звязвае паміж сабой макра- і мікраскапічныя параметры сістэмы "ідэальны газ".

Залежнасць ціску газу ад сярэдняга квадрата скорасці руху яго малекул тлумачыцца тым, што з павелічэннем скорасці, па-першае, узрастае імпульс малекулы, а значыць, і сіла ўдару аб сценку. Па-другое, узрастае колькасць удараў, паколькі малекулы часцей сутыкаюцца са сценкамі.

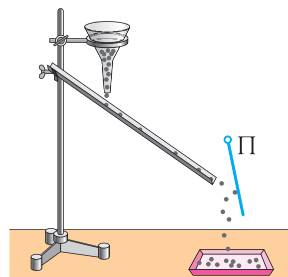
Абазначым праз $\langle E_\text{к} \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$ *сярэднюю кінетычную энергію паступальнага руху малекул*. Тады асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі набудзе наступны выгляд:

$$\boldsymbol{p = \frac{2}{3} n \langle E_\text{к} \rangle.} \qquad (3.3)$$

З выразу (3.3) бачна, што ціск ідэальнага газу залежыць ад сярэдняй кінетычнай энергіі паступальнага руху яго малекул і іх канцэнтрацыі.

Праілюстраваць залежнасць ціску ад скорасці руху малекул газу можна, выкарыстаўшы механічную мадэль. Збяром установку, якая паказана на рысунку 13. Замацуем пласціну *П* такім чынам, каб яна магла паварочвацца вакол гарызантальнай восі. Насыплем у лейку з вузкай гарлавінай дробны шрот. Выкарыстаўшы нахілены жолаб,

накіруем на пласціну струменьчык шроту (шрацінкі выконваюць ролю малекул). У выніку шматлікіх удараў шрацінак пласціна адхіліцца на некаторы вугал пад уздзеяннем сілы ціску шрацінак. Калі павялічыць вышыню, з якой скочваюцца шрацінкі, а значыць, і іх скорасць у момант удару аб пласціну, то можна заўважыць, што пласціна адхіліцца на большы вугал. Адсюль можна зрабіць вывад: чым большая скорасць руху шрацінак, тым большы ціск зведвае пласціна.



Рыс. 13

1. Ідэальны газ — мадэль газу, якая адпавядае наступным умовам: 1) малекулы газу можна лічыць матэрыяльнымі пунктамі, якія хаатычна рухаюцца; 2) сілы ўзаемадзеяння паміж малекуламі ідэальнага газу практычна адсутнічаюць (патэнцыяльная энергія ўзаемадзеяння роўная нулю); яны дзейнічаюць толькі пры сутыкненнях малекул, прычым гэта сілы адштурхвання.

2. Ураўненне, што звязвае мікрапараметры стану ідэальнага газу (масу малекулы і яе сярэднюю квадратычную скорасць $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$) з яго макрапараметрам (ціскам, які характарызуе газ як цэлае і які вымяраецца непасрэдна ў час доследу), называюць асноўным ураўненнем малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle.$$

3. Ціск ідэальнага газу залежыць ад сярэдняй кінетычнай энергіі паступальнага руху яго малекул і іх канцэнтрацыі:

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_{\text{к}} \rangle.$$

1. Пералічыце істотныя прыкметы паняцця “ідэальны газ”.

2. Які механізм узнікнення ціску газу з пункта гледжання малекулярна-кінетычнай тэорыі?

3. Ад якіх фізічных велічынь залежыць ціск ідэальнага газу?

4. Якая сувязь паміж ціскам ідэальнага газу і сярэдняй кінетычнай энергіяй паступальнага руху яго малекул?

5. У дзвюх пасудзінах знаходзіцца аднолькавая колькасць малекул ідэальнага газу. У якім выпадку ціск у пасудзінах будзе аднолькавы?

6. У балон, які змяшчае некаторую колькасць атамаў гелію, дадаюць такую ж колькасць малекул вадароду, сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху якіх роўная сярэдняй кінетычнай энергіі цеплавога руху атамаў гелію. У колькі разоў зменіцца ціск у пасудзіне?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Электрычная лямпа напоўнена газам, шчыльнасць якога $\rho = 0{,}90\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Пасля ўключэння лямпы ціск газу ў ёй павялічыўся ад $p_1 = 90$ кПа да $p_2 = 150$ кПа. Вызначце, на колькі пры гэтым павялічыўся сярэдні квадрат скорасці цеплавога руху малекул газу.

Дадзена:

$\rho = 0{,}90\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$p_1 = 90\ \text{кПа} = 9{,}0 \cdot 10^4\ \text{Па}$

$p_2 = 150\ \text{кПа} = 1{,}50 \cdot 10^5\ \text{Па}$

$\Delta\langle v^2\rangle$ — ?

Рашэнне. Знойдзем сувязь паміж шчыльнасцю ρ газу і канцэнтрацыяй n яго часціц. Шчыльнасць рэчыва роўная адносіне масы да яго аб'ёму. Паколькі здабытак масы m_0 адной малекулы на колькасць N малекул роўны масе рэчыва, то:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 n.$$

Тады асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі можна запісаць у выглядзе: $p = \frac{1}{3}\rho\langle v^2\rangle$.

Адсюль сярэдні квадрат скорасці цеплавога руху малекул газу $\langle v^2\rangle = \frac{3p}{\rho}$. Знойдзем змяненне сярэдняга квадрата скорасці цеплавога руху малекул газу пасля ўключэння лямпы: $\Delta\langle v^2\rangle = \frac{3p_2}{\rho} - \frac{3p_1}{\rho} = \frac{3}{\rho}(p_2 - p_1)$.

$$\Delta\langle v^2\rangle = \frac{3}{0{,}90\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}(1{,}50 \cdot 10^5\ \text{Па} - 9{,}0 \cdot 10^4\ \text{Па}) = 2{,}0 \cdot 10^5\ \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

Адказ: $\Delta\langle v^2\rangle = 2{,}0 \cdot 10^5\ \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$.

Прыклад 2. У пасудзіне ўмяшчальнасцю $V = 10$ л знаходзіцца аднаатамны газ, колькасць рэчыва якога $\nu = 2{,}0$ моль і ціск $p = 6{,}0 \cdot 10^5$ Па. Вызначце сярэднюю кінетычную энергію цеплавога руху атамаў гэтага газу.

Дадзена:
$V = 10$ л $= 1{,}0 \cdot 10^{-2}$ м^3
$p = 6{,}0 \cdot 10^5$ Па
$\nu = 2{,}0$ моль

$\langle E_к \rangle$ — ?

Рашэнне. З асноўнага ўраўнення малекулярна-кінетычнай тэорыі, запісанага ў выглядзе $p = \frac{2}{3} n \langle E_к \rangle$, вынікае, што $\langle E_к \rangle = \frac{3p}{2n}$. Паколькі канцэнтрацыя атамаў $n = \frac{N}{V}$, а іх колькасць $N = \nu N_A$, то $\langle E_к \rangle = \frac{3p}{2n} = \frac{3pV}{2N} = \frac{3pV}{2\nu N_A}$.

$$\langle E_к \rangle = \frac{3 \cdot 6{,}0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3}{2 \cdot 2{,}0 \text{ моль} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 7{,}5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

Адказ: $\langle E_к \rangle = 7{,}5 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Практыкаванне 2

1. Вызначце канцэнтрацыю малекул кіслароду, калі сярэдняе значэнне квадрата іх скорасці $\langle v^2 \rangle = 4{,}9 \cdot 10^5 \, \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$, а ціск газу $p = 2{,}0 \cdot 10^5$ Па.

2. У адной з дзвюх аднолькавых пасудзін знаходзіцца кісларод, а ў другой — азот. Колькасць малекул кожнага газу і сярэднія значэнні квадратаў іх скарасцей аднолькавыя. Вызначце ціск азоту, калі ціск кіслароду $p_1 = 32$ кПа.

3. Вызначце сярэднюю кінетычную энергію паступальнага руху малекул кіслароду пры нармальных умовах, калі іх канцэнтрацыя $n = 2{,}7 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$.

4. У балоне ўмяшчальнасцю $V = 4{,}0$ л знаходзіцца $N = 8{,}0 \cdot 10^{25}$ малекул азоту. Вызначце сярэднюю кінетычную энергію паступальнага руху малекул, калі ціск азоту $p = 2{,}0$ МПа.

5. У балоне ўмяшчальнасцю $V = 2{,}5$ м^3 знаходзіцца гелій масай $m = 3{,}0$ кг. Вызначце сярэдняе значэнне квадрата скорасці атамаў гелію, калі яго ціск $p = 100$ кПа.

6. У колькі разоў зменіцца ціск ідэальнага аднаатамнага газу, калі сярэдняя кінетычная энергія цеплавога руху яго атамаў павялічыцца ў тры разы, а аб'ём газу зменшыцца ў два разы?

7*. Як зменіцца ціск ідэальнага газу, калі сярэдняе значэнне квадрата скорасці яго малекул павялічыцца на 10 %, а аб'ём газу зменшыцца на 50 %?

§ 4. Цеплавая раўнавага. Тэмпература — мера сярэдняй кінетычнай энергіі цеплавога руху часціц рэчыва. Закон Дальтана

У паўсядзённым жыцці пад тэмпературай мы разумеем ступень нагрэтасці цела (халоднае, цёплае, гарачае). Такі падыход з'яўляецца даволі суб'ектыўным, бо залежыць не толькі ад стану разглядаемага цела, але і ад нашых адчуванняў. Каб пазбегнуць суб'ектыўнай нявызначанасці, неабходна знайсці спосаб вымярэння тэмпературы.

Цеплавая раўнавага. Калі два целы судакранаюцца, то іх малекулы ўступаюць ва ўзаемадзеянне паміж сабой. Пры гэтым адбываецца перадача энергіі ад малекул з большай кінетычнай энергіяй да малекул з меншай кінетычнай энергіяй. У выніку сярэдняя энергія паступальнага руху малекул аднаго цела павялічваецца, а другога — памяншаецца. Цела, якое аддае энергію, называюць больш нагрэтым, а цела, да якога энергія пераходзіць, — менш нагрэтым. Як паказвае вопыт, такі пераход энергіі працягваецца да таго часу, пакуль не ўсталюецца пэўны стан, у якім целы могуць знаходзіцца колькі заўгодна. У гэтым стане ступень нагрэтасці цел становіцца аднолькавай і такой застаецца, а значыць, целы маюць аднолькавую тэмпературу. Гэта ўлічваюць пры вымярэнні тэмпературы цела. Тэрмометр прыціскаюць да цела, але адлік яго паказанняў робяць не адразу, а праз некаторы прамежак часу. Гэта неабходна для таго, каб паміж тэрмометрам і целам усталявалася цеплавая раўнавага.

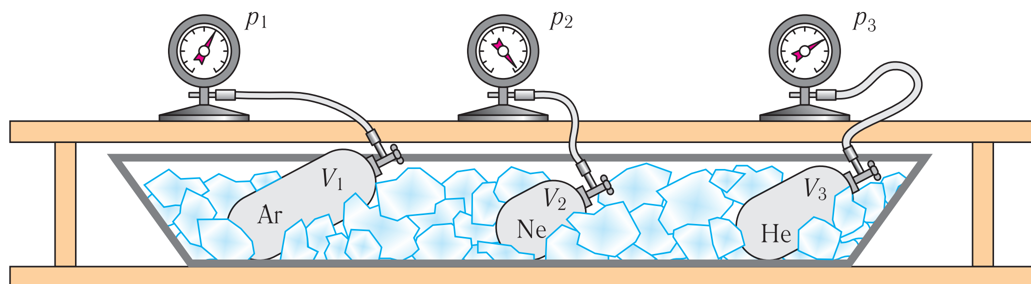
Цеплавой раўнавагай называюць такі стан, пры якім усе макраскапічныя параметры ізаляванай сістэмы застаюцца нязменнымі на працягу неабмежавана вялікага прамежку часу. Пад *ізаляванай*, або *замкнутай*, *сістэмай* разумеюць сістэму цел, якая не абменьваецца энергіяй з целамі, што яе акружаюць.

Адзначым, што целы фізічнай сістэмы, якая знаходзіцца ў стане цеплавой раўнавагі, могуць мець розныя значэнні шчыльнасці, канцэнтрацыі, ціску і аб'ёму. Аднак *тэмпература ўсіх цел, што складаюць такія сістэмы, заўсёды аднолькавая.*

Тэмпература і сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул газу. Вызначэнне тэмпературы павінна грунтавацца на такой фізічнай велічыні, якая характарызуе стан цел і з'яўляецца аднолькавай для любых цел, што знаходзяцца ў стане цеплавой раўнавагі. Неабходнай уласцівасцю вало-

дае *сярэдняя кінетычная энергія цеплавога руху часціц рэчыва.* Гэту энергію лягчэй за ўсё вызначыць для ідэальнага аднаатамнага газу, атамы якога здзяйсняюць толькі паступальны рух.

Возьмем некалькі ёмістасцей рознай умяшчальнасці, аснашчаных манометрамі для вымярэння ціску (рыс. 14). Запоўніўшы іх рознымі газамі, напрыклад аргонам, неонам і геліем, змесцім спачатку ў пасудзіну з лёдам, які растае́ ($t_0 = 0$ °C), а затым будзем змяняць тэмпературу змесціва ёмістасцей, пакуль яна не стане роўнай тэмпературы кіпення вады ($t = 100$ °C). Ціск газаў у ёмістасцях можа адрозніваццa. Масы газаў можна вызначыць шляхам узважвання адпампаваных і напоўненых ёмістасцей. Ведаючы масу m і малярную масу M газу, па формуле $N = \frac{m}{M} N_A$ можна вылічыць колькасць часціц і, значыць, вызначыць іх канцэнтрацыю $n = \frac{N}{V}$ у кожнай з ёмістасцей.



Рыс. 14

Доследным шляхам было ўстаноўлена, што ў стане цеплавой раўнавагі, нягледзячы на розныя значэнні ціску p і канцэнтрацыі n часціц, адносіна $\frac{p}{n}$ ціску да канцэнтрацыі ва ўсіх ёмістасцях аказалася практычна аднолькавай: $\frac{p}{n} = \Theta$. Гэтая адносіна для разрэджаных газаў (якія адпавядаюць патрабаванням мадэлі "ідэальны газ") залежыць толькі ад тэмпературы, прычым гэта залежнасць з'яўляецца лінейнай, г. зн.

$$\frac{p}{n} = \Theta = k(t - t_0).$$

Тут Θ характарызуе тэмпературу газаў у энергетычных адзінках (у СІ яе вымяраюць у джоўлях). k — каэфіцыент прапарцыянальнасці, які залежыць ад выбару тэмпературнай шкалы. Каэфіцыент k носіць назву *пастаяннай Больцмана* ў гонар аўстрыйскага фізіка Людвіга Больцмана (1844—1906), аднаго з заснавальнікаў малекулярна-кінетычнай тэорыі газаў:

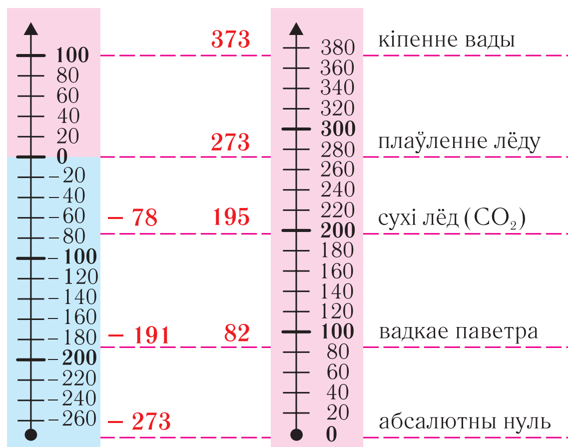
$$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Калі для вымярэння тэмпературы выкарыстоўваюць шкалу Кельвіна, то пры вызначэнні лікавага значэння тэмпературы па гэтай шкале мяркуюць, што

$$\frac{p}{n} = kT, \text{ г. зн. } T = \frac{p}{nk}. \qquad (4.1)$$

Суадносіна (4.1) дазваляе стварыць тэмпературную шкалу, якая не залежыць ад роду рэчыва (газу). Такую шкалу, якую называюць *абсалютнай (тэрмадынамічнай) шкалой тэмператур*, прапанаваў у 1848 г. вядомы англійскі фізік Уільям Томсан (1824—1907), атрымаўшы за работы ў галіне фізікі ў 1892 г. тытул лорда Кельвіна. Таму гэту шкалу звычайна называюць *шкалой Кельвіна*.

Нулявы пункт па шкале Кельвіна адпавядае самай нізкай тэарэтычна магчымай тэмпературы (абсалютны нуль тэмпературы). Тэмпература лёду, які растае́, па гэтай шкале $T_0 = 273{,}15$ К. Сувязь паміж тэмпературамі па шкале Цэльсія (t) і па шкале Кельвіна (T) мае выгляд $T = t + 273{,}15$.



Рыс. 15

Адзінка тэмпературы па абсалютнай шкале адзін кельвін (1К) з'яўляецца асноўнай адзінкай тэмпературы ў СІ і супадае з адным градусам (1 °С) па шкале Цэльсія. Таму рознасць тэмператур па шкале Кельвіна і па шкале Цэльсія аднолькавая, г. зн. $\Delta T = \Delta t$ (рыс. 15).

З асноўнага ўраўнення малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу (3.2) вынікае:

$$\frac{p}{n} = \frac{2}{3}\langle E_к \rangle, \text{ г. зн. } \frac{2}{3}\langle E_к \rangle = kT.$$

Сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул

газаў, якія знаходзяцца пры аднолькавай тэмпературы, аднолькавая для розных газаў, прычым яе значэнне прапарцыянальнае тэмпературы і не залежыць ад масы малекулы газу:

$$\langle E_к \rangle = \frac{3}{2}kT. \quad (4.2)$$

Дадзеная суадносіна ўстанаўлівае сувязь паміж макраскапічным параметрам стану ідэальнага газу — тэмпературай T і мікраскапічным — сярэдняй кінетычнай энергіяй $\langle E_к \rangle$ паступальнага руху яго часціц. Такім чынам, з формулы (4.2) вынікае, што *сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху часціц ідэальнага газу прапарцыянальная яго абсалютнай тэмпературы*.

Гэты вывад, заснаваны на эксперыментах з разрэджанымі газамі, праўдзівы для вадкасцей і цвёрдых цел.

Ураўненне (4.2) можна запісаць наступным чынам: $\frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2}kT$, адкуль

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

З улікам формулы (4.2) асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу можна запісаць у выглядзе

$$p = nkT. \quad (4.3)$$

З ураўнення (4.3) бачна, што пры аднолькавых значэннях тэмпературы T і канцэнтрацыі n часціц ціск любых газаў аднолькавы незалежна ад таго, з якіх часціц яны складаюцца.

Закон Дальтана. Разгледзім сумесь хімічна не рэагуючых разрэджаных газаў, што знаходзяцца ў пасудзіне ўмяшчальнасцю V. Цеплавы рух часціц кожнага газу раўнамерна размяркоўвае іх па ўсім аб'ёме пасудзіны. У выніку сутыкнення часціц адна з адной у сумесі ўсталёўваецца цеплавая раўнавага. Дакажам, што ціск кожнага газу, што ўваходзіць у састаў сумесі, не залежыць ад наяўнасці астатніх разрэджаных газаў і выніковы ціск вызначаецца сумарным ціскам усіх кампанентаў сумесі газаў.

Агульная колькасць часціц газаў у пасудзіне $N = N_1 + N_2 + ... + N_i$, дзе N_1, N_2, ..., N_i — колькасць часціц кожнага газу.

Абазначым праз p_1, p_2, ..., p_i парцыяльныя ціскі кожнага газу. *Парцыяльны ціск* — такі ціск газу, які ўваходзіць у састаў газавай сумесі, калі б

ён адзін займаў увесь аб'ём, аддадзены сумесі, пры той жа тэмпературы. Тады, улічыўшы суадносіну (4.3), запішам:

$$p = nkT = \frac{N}{V}kT = \frac{kT}{V}(N_1 + N_2 + ... + N_i), \text{ значыць,}$$

$$\boxed{p = p_1 + p_2 + ... + p_i.} \quad (4.4)$$

Формула (4.4) з'яўляецца матэматычным выразам закона, эксперыментальна ўстаноўленага ў 1801 г. англійскім вучоным Джонам Дальтанам (1766—1844) і названага *законам Дальтана*. Згодна з гэтым законам **ціск сумесі хімічна не рэагуючых паміж сабой газаў роўны суме парцыяльных ціскаў кожнага з газаў**.

1. Цеплавой раўнавагай называюць такі стан ізаляванай фізічнай сістэмы, пры якім ўсе яе макраскапічныя параметры застаюцца нязменнымі з цягам часу. У стане цеплавой раўнавагі тэмпература розных частак фізічнай сістэмы аднолькавая.

2. Сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул газу прапарцыянальная абсалютнай тэмпературы: $\langle E_к \rangle = \frac{3}{2}kT$.

3. Сярэдняя квадратычная скорасць малекул газу $\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$.

4. Ціск ідэальнага газу прама прапарцыянальны канцэнтрацыі яго малекул і абсалютнай тэмпературы газу: $p = nkT$.

5. Тэмпературную шкалу, якая не залежыць ад роду рэчыва, называюць абсалютнай (тэрмадынамічнай) шкалой тэмператур (шкалой Кельвіна). Тэмпература па шкале Кельвіна (T) прыбліжана звязана з тэмпературай па шкале Цэльсія (t) суадносінай $T = t + 273$.

6. Ціск сумесі хімічна не рэагуючых паміж сабой разрэджаных газаў роўны суме парцыяльных ціскаў кожнага з газаў (закон Дальтана):

$$p = p_1 + p_2 + ... + p_i,$$

дзе парцыяльны ціск — ціск газу, які ўваходзіць у састаў газавай сумесі, калі б ён адзін займаў увесь аб'ём, аддадзены сумесі, пры той жа тэмпературы.

1. Якая велічыня характарызуе стан цеплавой раўнавагі?

2. Як залежыць сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул ідэальнага газу ад тэмпературы?

3. Ці супадаюць сярэднія квадратычныя скорасці малекул кіслароду і азоту ў паветры?

4. Пры награванні газу ў балоне сярэдняя квадратычная скорасць малекул павялічылася ў два разы. Як змяніўся ціск газу?

5. Што ўяўляе сабой абсалютная шкала тэмператур? Што прынята за адзінку абсалютнай тэмпературы ў СІ? Як суадносяцца тэмпературы па шкале Цэльсія і па шкале Кельвіна?

6. Як звязаны ціск ідэальнага газу з яго тэмпературай і канцэнтрацыяй малекул?

7. Які ціск называюць парцыяльным? Сфармулюйце закон Дальтана.

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Параўнайце сярэднія квадратычныя скорасці атамаў гелію і малекул кіслароду, калі абодва газы знаходзяцца ў стане цеплавой раўнавагі.

Дадзена:
$M_1 = 4{,}0\ \frac{\text{г}}{\text{моль}}$
$M_2 = 32\ \frac{\text{г}}{\text{моль}}$
$T_1 = T_2 = T$

$\frac{\langle v_{\text{кв}1} \rangle}{\langle v_{\text{кв}2} \rangle}$ — ?

Рашэнне. З асноўнага ўраўнення малекулярна-кінетычнай тэорыі $p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle$ і ўраўнення $p = nkT$ вынікае, што $\langle v^2 \rangle = \frac{3kT}{m_0}$.

Паколькі $m_0 = \frac{M}{N_A}$, то $\langle v^2 \rangle = \frac{3N_A kT}{M}$. Паколькі газы знаходзяцца ў стане цеплавой раўнавагі, г. зн. $T_1 = T_2 = T$, то сярэднія квадраты скарасцей атамаў гелію $\langle v_1^2 \rangle = \frac{3N_A kT}{M_1}$, малекул кіслароду — $\langle v_2^2 \rangle = \frac{3N_A kT}{M_2}$.

Адсюль $\langle v_{\text{кв}1} \rangle = \sqrt{\langle v_1^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3N_A kT}{M_1}}$, $\langle v_{\text{кв}2} \rangle = \sqrt{\langle v_2^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3N_A kT}{M_2}}$.

Тады $\frac{\langle v_{\text{кв}1} \rangle}{\langle v_{\text{кв}2} \rangle} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$, $\frac{\langle v_{\text{кв}1} \rangle}{\langle v_{\text{кв}2} \rangle} = \sqrt{\frac{32\ \frac{\text{г}}{\text{моль}}}{4{,}0\ \frac{\text{г}}{\text{моль}}}} = 2\sqrt{2} = 2{,}8.$

Адказ: у стане цеплавой раўнавагі сярэдняя квадратычная скорасць атамаў гелію ў 2,8 раза большая за сярэднюю квадратычную скорасць малекул кіслароду.

Прыклад 2. У балоне ўмяшчальнасцю $V = 14$ л знаходзіцца газ, тэмпература якога $T = 290$ K. Пры расходаванні газу з балона выпусцілі $N = 1{,}0 \cdot 10^{22}$ малекул. Вызначце, на колькі зменшыўся ціск газу ў балоне, калі праз некаторы прамежак часу яго тэмпература павялічылася да першапачатковага значэння.

Дадзена:
$V = 14$ л $= 1{,}4 \cdot 10^{-2}$ м^3
$T = 290$ K
$N = 1{,}0 \cdot 10^{22}$

$p_1 - p_2$ — ?

Рашэнне. Пачатковы ціск газу $p_1 = n_1 kT = \frac{N_1}{V} kT$. Калі зрасходавалі частку газу, яго ціск пасля таго, як тэмпература павялічылася да першапачатковага значэння T, стаў $p_2 = n_2 kT = \frac{N_2}{V} kT$. Тады змяншэнне ціску газу $p_1 - p_2 = \frac{kT}{V}(N_1 - N_2) = \frac{kTN}{V}$.

$$p_1 - p_2 = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 290\ \text{К} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{22}}{1{,}4 \cdot 10^{-2} \text{м}^3} = 2{,}9\ \text{кПа}.$$

Адказ: $p_1 - p_2 = 2{,}9$ кПа.

Практыкаванне 3

1. Тэмпература цела па шкале Цэльсія $t = -53{,}0$ °C. Чаму роўная тэмпература гэтага ж цела па шкале Кельвіна?

2. Тэмпература цела па абсалютнай шкале: а) $T = 473$ K; б) $T = 120$ K. Чаму роўная тэмпература гэтага цела па шкале Цэльсія ў кожным выпадку?

3. Вызначце сярэднюю кінетычную энергію паступальнага руху часціц ідэальнага газу, тэмпература якога $t = 20$ °C.

4. Вызначце колькасць малекул ідэальнага газу, што знаходзіцца ў пасудзіне ўмяшчальнасцю $V = 1{,}4$ л, калі яго тэмпература $t = 27$ °C, а ціск $p = 3{,}0$ кПа.

5. Вадарод, тэмпература якога $T = 290$ K, а маса $m = 2{,}0$ кг, знаходзіцца ў пасудзіне ўмяшчальнасцю $V = 2{,}0$ м^3. Вызначце ціск вадароду.

6. Тэмпература паветра, што знаходзіцца ў пасудзіне, $t_1 = 24{,}0$ °C. На колькі градусаў павялічылася тэмпература паветра, калі сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху яго малекул павялічылася ў два разы?

7. Вызначце шчыльнасць азоту, ціск якога $p = 1{,}1 \cdot 10^5$ Па і тэмпература $T = 298$ K.

8*. У некаторых краінах тэмпературу вымяраюць па шкале Фарэнгейта. Па гэтай шкале пункту замярзання вады адпавядае тэмпература $t_з = 32$ °F, пункту яе кіпення — тэмпература $t_к = 212$ °F. Вызначце нармальную тэмпературу чалавечага цела па шкале Фарэнгейта.

9*. На колькі працэнтаў зменіцца ціск ідэальнага газу, які знаходзіцца ў закрытай пасудзіне, калі сярэдняя квадратычная скорасць яго малекул павялічыцца на 20 %?

§ 5. Ураўненне стану ідэальнага газу. Ізатэрмічны, ізабарны і ізахорны працэсы

Мы разгледзелі ідэальны газ з пазіцый малекулярна-кінетычнай тэорыі. Высветлілі залежнасць ціску ідэальнага газу ад канцэнтрацыі яго малекул і тэмпературы. Але як звязаны паміж сабой ціск ідэальнага газу, яго маса, аб'ём і тэмпература?

Ураўненне стану ідэальнага газу. Стан макраскапічнай сістэмы цалкам вызначаны, калі вядомы яе макраскапічныя параметры — ціск p, тэмпература T і аб'ём V. Ураўненне, якое звязвае параметры дадзенага стану, называюць *ураўненнем стану сістэмы*. Змяненне двух і больш параметраў стану сістэмы з цягам часу называюць *працэсам*.

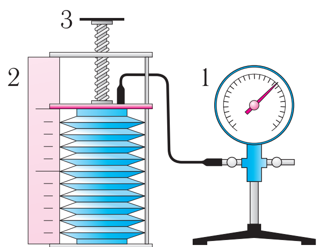
Калі пры пераходзе ідэальнага газу з аднаго стану ў другі колькасць яго малекул $N = \frac{m}{M} N_A$ застаецца пастаяннай, г. зн. маса і малярная маса газу не змяняюцца, то з ураўненняў $p = nkT$ і $n = \frac{N}{V}$ вынікае:

$$p_1V_1 = NkT_1, \quad p_2V_2 = NkT_2, \tag{5.1}$$

дзе k — пастаянная Больцмана, p_1, V_1, T_1 — параметры пачатковага стану газу, а p_2, V_2, T_2 — канчатковага. З суадносіны (5.1) вынікае, што

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}, \quad \text{або} \quad \boxed{\frac{pV}{T} = \text{const.}} \tag{5.2}$$

Ураўненне стану ў выглядзе (5.2) упершыню вывеў у 1834 г. французскі фізік Бенуа Клапейрон (1799—1864), таму яго называюць ураўненнем Клапейрона. Такім чынам, **пры нязменных масе і малярнай масе ідэальнага газу адносіна здабытку яго ціску і аб'ёму да абсалютнай тэмпературы з'яўляецца велічынёй пастаяннай**. Ураўненне (5.2) звязвае два станы ідэальнага газу незалежна ад таго, якім чынам газ перайшоў з аднаго стану ў другі.



Рыс. 16

У праўдзівасці ўраўнення стану можна пераканацца, выкарыстаўшы ўстаноўку, паказаную на рысунку 16. Манометрам *1*, які злучаны з герметычнай гафрыраванай пасудзінай, рэгіструюць ціск газу ўнутры пасудзіны. Аб'ём газу ў пасудзіне можна вымераць з дапамогай лінейкі *2*. Тэмпература газу ў пасудзіне роўная тэмпературы навакольнага асяроддзя, і яе можна вымераць тэрмометрам.

Вызначыўшы параметры газу p_1, V_1, T_1 у пачатковым стане, вылічваюць адносіну $\frac{p_1V_1}{T_1}$. Пасля гэтага змяшчаюць пасудзіну ў гарачую ваду, тым самым змяняючы тэмпературу газу і яго ціск. Верцячы вінт *3*, змяняюць умяшчальнасць пасудзіны. Вымераўшы зноў ціск газу p_2, яго аб'ём V_2 і тэмпературу T_2, вылічваюць адносіну $\frac{p_2V_2}{T_2}$. Як паказваюць разлікі, ураўненне стану (5.2) выконваецца ў межах хібнасці эксперымента.

Рэальныя газы задавальняюць ураўненне стану ідэальнага газу пры не вельмі значных цісках (пакуль уласны аб'ём усіх малекул газу надзвычай малы ў параўнанні з умяшчальнасцю пасудзіны, у якой знаходзіцца газ) і пры не вельмі нізкіх або высокіх тэмпературах (пакуль абсалютнае значэнне патэнцыяльнай энергіі міжмалекулярнага ўзаемадзеяння надзвычай малое ў параўнанні з кінетычнай энергіяй цеплавога руху малекул).

Паколькі колькасць часціц $N = \frac{m}{M}N_A$, дзе m — маса газу, M — яго малярная маса, N_A — пастаянная Авагадра, то з (5.1) вынікае:

$$pV = kN_A\frac{m}{M}T.$$

Увядзём новую пастаянную R, роўную здабытку пастаянных Больцмана і Авагадра:

$$R = kN_A = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \frac{1}{\text{моль}} = 8{,}31\ \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Пастаянную R называюць *універсальнай газавай пастаяннай*. Тады

$$\boldsymbol{pV = \frac{m}{M}RT} \qquad (5.3)$$

або з улікам таго, што колькасць рэчыва $\nu = \frac{m}{M}$:

$$pV = \nu RT.$$

Ураўненне стану ў выглядзе (5.3) упершыню было атрымана рускім вучоным Д. І. Мендзялеевым (1834—1907) у 1874 г., таму яго называюць ураўненнем Клапейрона—Мендзялеева.

Адзначым, што ўраўненне Клапейрона—Мендзялеева звязвае паміж сабой параметры канкрэтнага стану ідэальнага газу. Выкарыстаўшы ўраўненне Клапейрона—Мендзялеева, можна апісаць розныя працэсы, якія адбываюцца ў ідэальным газе.

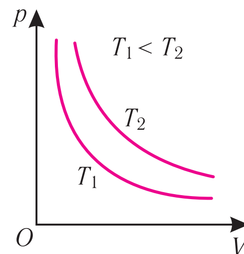
Працэсы ў газах часта адбываюцца так, што змяняюцца толькі два параметры з пяці (p, V, T, m, M). Калі адзін з макрапараметраў (p, V, T), што ўваходзяць ва ўраўненне стану ідэальнага газу, не змяняецца, то такія працэсы называюць *ізапрацэсамі*.

Ізатэрмічны працэс. Працэс змянення стану газу пры пастаяннай тэмпературы ($T = \text{const}$) называюць *ізатэрмічным*. Калі маса ідэальнага газу і яго малярная маса не змяняюцца, то з ураўнення Клапейрона—Мендзялеева вынікае:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \text{const}, \text{ або } p = \frac{\nu RT}{V} = \frac{\text{const}}{V}. \quad (5.4)$$

Такім чынам, **ціск дадзенай масы газу пры пастаянных малярнай масе і тэмпературы адваротна прапарцыянальны яго аб'ёму**. Гэтае сцверджанне называюць законам Бойля—Марыёта. Закон Бойля—Марыёта апісвае ізатэрмічны працэс у ідэальным газе, маса і малярная маса якога пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы не змяняюцца.

Праўдзівасць закона Бойля—Марыёта можна праверыць эксперыментальна, выкарыстаўшы ўстаноўку, паказаную на рысунку 16. Калі падтрымліваць пастаянную тэмпературу газу, то змяншэнне яго аб'ёму пры вярчэнні вінта *3* пацягне за сабой павелічэнне ціску, і наадварот, павелічэнне аб'ёму прывядзе да памяншэння ціску. Аднак здабытак pV застаецца пастаянным: $pV = \text{const}$.



Рыс. 17

Графік такога працэсу ў каардынатах (p, V) уяўляе сабой гіпербалу (рыс. 17). У фізіцы гэту крывую называюць *ізатэрмай*. Розным значэнням тэмпературы адпавядаюць розныя ізатэрмы. Згодна з ураўненнем стану $p = \frac{\nu RT}{V}$ для аднаго і

таго ж аб’ёму газу, чым большы ціск, тым вышэйшая яго тэмпература (гл. рыс. 17).

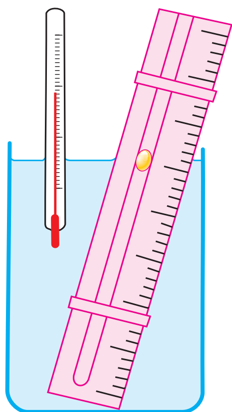
Доследы паказалі, што рэальныя газы падпарадкоўваюцца закону Бойля—Марыёта тым больш дакладна, чым меншая іх шчыльнасць. Пры значным павелічэнні ціску гэты закон не выконваецца.

Ізатэрмічны працэс можна адлюстраваць і ў каардынатах (p, T) і (V, T). Зрабіце гэта самастойна.

Ізабарны працэс. Працэс змянення стану газу пры пастаянным ціску $(p = \text{const})$ называюць *ізабарным*. Упершыню ён быў разгледжаны ў 1802 г. французскім вучоным Жозефам Гей-Люсакам (1778—1850). Калі пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы маса і малярная маса газу не змяняюцца, то аб’ём газу, як вынікае з ураўнення Клапейрона—Мендзялеева (5.3):

$$V = \frac{mR}{pM}T \text{ або } V = \frac{\nu R}{p}T, \text{ г. зн. } V = \text{const } T. \qquad (5.5)$$

Такім чынам, ізабарны працэс у ідэальным газе апісваюць законам, згодна з якім **аб’ём дадзенай масы газу пры пастаянных малярнай масе і ціску прама прапарцыянальны абсалютнай тэмпературы**. Праўдзівасць закона Гей-Люсака можна праверыць эксперыментальна, выкарыстаўшы ўстаноўку, адлюстраваную на рысунку 18. Вадкасць у пасудзіне знаходзіцца ў цеплавой раўнавазе з тонкай трубкай, запоўненай паветрам, якое закрыта слупком алею. Пры павелічэнні тэмпературы вадкасці аб’ём паветра, што знаходзіцца ў трубцы пад слупком алею, узрастае, а пры паніжэнні тэмпературы — змяншаецца.

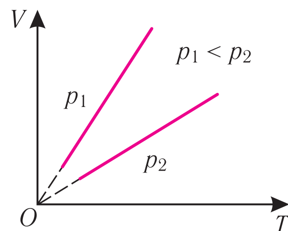


Рыс. 18

Паколькі $V \sim T$, то ў каардынатах (V, T) графік ізабарнага працэсу для ідэальнага газу ўяўляе сабой прамую лінію, працяг якой праходзіць праз пачатак каардынат (рыс. 19). Гэту лінію называюць *ізабарай*. Ізабара рэальнага газу не можа быць працягнута да нулявога значэння тэмпературы (на графіку пункцірная лінія), таму што пры нізкіх тэмпературах усе газы пачынаюць істотна адрознівацца ад мадэлі “ідэальны газ” і пры далейшым паніжэнні тэмпературы ператвараюцца ў вадкасці. У адных і тых жа каардынатах (V, T) можна пабудаваць некалькі ізабар, якія будуць адпавядаць розным ціскам дадзенай масы ідэальнага газу пры нязменнай малярнай масе.

Аналіз графікаў (гл. рыс. 19) і суадносіны $V = \frac{mR}{pM}T$ дазваляе зрабіць вывад, што большаму ціску p адпавядае меншы нахіл ізабары да восі тэмператур T.

Ізабарны працэс можна адлюстраваць і ў каардынатах (p, V) і (p, T). Зрабіце гэта самастойна.



Рыс. 19

! Ураўненне (5.5) ізабарнага працэсу можна запісаць у іншым выглядзе. Няхай дадзеная маса ідэальнага газу пры ціску p і тэмпературы $T_0 = 273{,}15$ К займае некаторы аб'ём V_0. Ураўненне стану газу для гэтага выпадку мае выгляд

$$\frac{pV_0}{T_0} = \frac{m}{M}R.$$

Будзем лічыць, што газ ізабарна нагрэлі да тэмпературы $T = 273{,}15 + t$, дзе t — тэмпература па шкале Цэльсія. Для гэтага стану можна запісаць $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M}R$. Пасля супастаўлення дзвюх роўнасцей прыходзім да вываду, што $\frac{V_0}{T_0} = \frac{V}{T}$. Тады

$$V = V_0\left(1 + \frac{1}{273{,}15}t\right).$$

Адносіну $\frac{1}{273{,}15} = \alpha$, якая з'яўляецца пастаяннай велічынёй для ўсіх разрэджаных газаў, называюць *тэмпературным (тэрмічным) каэфіцыентам аб'ёмнага расшырэння* газу пры пастаянным ціску, які характарызуе адноснае павелічэнне аб'ёму газу пры змяненні яго тэмпературы на адзін градус. Каэфіцыент α вымяраюць у $К^{-1}$. З улікам гэтага ўраўненне ізабарнага працэсу будзе мець выгляд

$$V = V_0(1 + \alpha t).$$

Як бачна з апошняй суадносіны, аб'ём дадзенай масы газу пры пастаянным ціску лінейна ўзрастае з ростам тэмпературы.

Ізахорны працэс. Працэс змянення стану газу пры пастаянным аб'ёме $(V = \text{const})$ называюць *ізахорным*. Упершыню ён быў разгледжаны ў 1787 г. французскім вучоным Жакам Шарлем (1746—1823). Калі пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы маса і малярная маса газу не змяняюцца,

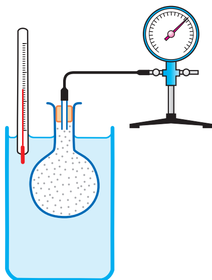
то ціск газу, як вынікае з ураўнення Клапейрона—Мендзялеева (5.3):

$$p = \frac{mR}{VM}T \quad \text{або} \quad p = \frac{\nu R}{V}T, \quad \text{г. зн.} \quad p = \text{const}\, T. \qquad (5.6)$$

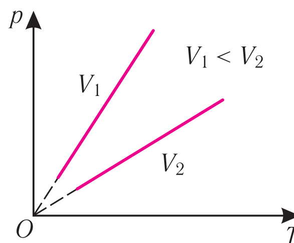
Такім чынам, ізахорны працэс у ідэальным газе апісваюць законам, згодна з якім **ціск дадзенай масы газу пры пастаянных малярнай масе і аб'ёме прама прапарцыянальны абсалютнай тэмпературы**. Праўдзівасць закона Шарля можна праверыць эксперыментальна, выкарыстаўшы ўстаноўку, адлюстраваную на рысунку 20. Колба з паветрам, злучаная з манометрам, знаходзіцца ў цеплавой раўнавазе з вадкасцю ў пасудзіне. Пры павелічэнні тэмпературы вадкасці ціск паветра ў колбе ўзрастае, а пры паніжэнні тэмпературы ціск паветра змяншаецца.

У каардынатах (p, T) графік ізахорнага працэсу для ідэальнага газу, маса і малярная маса якога пастаянныя, уяўляе сабой прамую лінію, працяг якой праходзіць праз пачатак каардынат (рыс. 21). Гэту лінію называюць *ізахорай*.

Як і ў выпадку ізабарнага працэсу, ізахора рэальнага газу не можа быць працягнута да нулявога значэння тэмпературы. Ізахору можна адлюстраваць і ў каардынатах (p, V) і (V, T). Зрабіце гэта самастойна.



Рыс. 20



Рыс. 21

У адных і тых жа каардынатах (p, T) можна пабудаваць некалькі ізахор, якія адпавядаюць розным аб'ёмам дадзенай масы газу пры нязменнай малярнай масе. Аналіз суадносін (5.6) паказвае, што большаму аб'ёму V адпавядае меншы нахіл ізахоры да восі тэмператур T (гл. рыс. 21).

Калі тэмпературу t вымяраць па шкале Цэльсія, то $p = p_0(1+\gamma t)$, дзе p_0 — ціск газу пры тэмпературы $t_0 = 0\ ^\circ\text{C}$, γ — тэмпературны каэфіцыент ціску, які для ўсіх разрэджаных газаў $\gamma = \frac{1}{273{,}15}\ \text{K}^{-1}$.

1. Пры пастаянных масе і малярнай масе ідэальнага газу адносіна здабытку ціску газу і яго аб'ёму да абсалютнай тэмпературы з'яўляецца велічынёй пастаяннай (ураўненне стану ідэальнага газу):

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \; pV = \frac{m}{M}RT.$$

2. Ціск дадзенай масы ідэальнага газу пры пастаянных малярнай масе і тэмпературы адваротна прапарцыянальны аб'ёму газу (ізатэрмічны працэс):

$$p = \frac{\text{const}}{V}.$$

3. Аб'ём дадзенай масы ідэальнага газу пры пастаянных малярнай масе і ціску прама прапарцыянальны абсалютнай тэмпературы (ізабарны працэс):

$$V = \text{const}\; T.$$

4. Ціск дадзенай масы ідэальнага газу пры пастаянных малярнай масе і аб'ёме прама прапарцыянальны абсалютнай тэмпературы (ізахорны працэс):

$$p = \text{const}\; T.$$

1. Што называюць ураўненнем стану ідэальнага газу? Як звязаны параметры ідэальнага газу ў дадзеным ураўненні?

2. Як звязаны ціск і аб'ём ідэальнага газу пры ізатэрмічным працэсе?

3. Як звязаны аб'ём і тэмпература ідэальнага газу пры ізабарным працэсе?

4. Як звязаны ціск і тэмпература ідэальнага газу пры ізахорным працэсе?

5. Пры якіх умовах праўдзівы кожны з законаў для ізапрацэсаў у рэальным газе?

6*. Якое паветра больш цяжкае — сухое або вільготнае (пры аднолькавых тэмпературы і ціску)?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. У дзвюх пасудзінах умяшчальнасцю $V_1 = 20$ л і $V_2 = 30$ л знаходзяцца хімічна не рэагуючыя ідэальныя газы, ціск якіх $p_1 = 1{,}0$ МПа і $p_2 = 0{,}40$ МПа адпаведна. Вызначце ціск у пасудзінах пасля таго, як іх злучылі тонкай кароткай трубкай. Тэмпература газаў перад злучэннем і пасля злучэння пасудзін аднолькавая.

Дадзена:
$V_1 = 20$ л $= 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ м^3
$V_2 = 30$ л $= 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ м^3
$p_1 = 1{,}0$ МПа $= 1{,}0 \cdot 10^6$ Па
$p_2 = 0{,}40$ МПа $= 4{,}0 \cdot 10^5$ Па
$T = \text{const}$

p — ?

Рашэнне. Ціск сумесі газаў роўны суме парцыянальных ціскаў (закон Дальтана): $p = p_1' + p_2'$.

Знойдзем парцыяльныя ціскі газаў пасля злучэння пасудзін. Паколькі тэмпература і масы газаў не змяняюцца, то пачатковы і канчатковы станы кожнага з газаў звязаны законам Бойля—Марыёта, г. зн. $p_1V_1 = p_1'(V_1 + V_2)$, $p_2V_2 = p_2'(V_1 + V_2)$. Адсюль парцыяльныя ціскі газаў пасля злучэння пасудзін адпаведна: $p_1' = \dfrac{p_1V_1}{V_1 + V_2}$, $p_2' = \dfrac{p_2V_2}{V_1 + V_2}$. Такім чынам, $p = \dfrac{p_1V_1 + p_2V_2}{V_1 + V_2}$.

$$p = \frac{1{,}0 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 + 4{,}0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3}{2{,}0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 + 3{,}0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3} = 6{,}4 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0{,}64 \text{ МПа}.$$

Адказ: $p = 0{,}64$ МПа.

Прыклад 2. Балон з газам, ціск якога $p_1 = 2{,}84$ МПа, знаходзіўся ў неацепленым памяшканні, дзе тэмпература паветра $t_1 = 7$ °C. Пасля таго як некаторая колькасць газу была зрасходавана, балон унеслі ў памяшканне, дзе тэмпература паветра $t_2 = 27$ °C. Вызначце, якая частка газу была зрасходавана, калі пасля працяглага знаходжання балона ў памяшканні ціск газу ў ім стаў $p_2 = 1{,}52$ МПа.

Дадзена:
$p_1 = 2{,}84$ МПа $= 2{,}84 \cdot 10^6$ Па
$T_1 = 280$ К
$T_2 = 300$ К
$p_2 = 1{,}52$ МПа $= 1{,}52 \cdot 10^6$ Па

$\dfrac{m_1 - m_2}{m_1}$ — ?

Рашэнне. Калі не прымаць пад увагу цеплавое расшырэнне балона, то яго ўмяшчальнасць не змяняецца. Запішам ураўненне Клапейрона—Мендзялеева для пачатковага і канчатковага станаў газу, палічыўшы яго ідэальным:

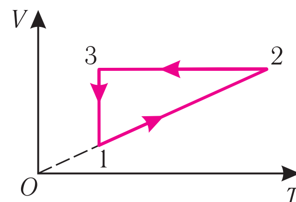
$p_1V = \dfrac{m_1}{M}RT_1$, $p_2V = \dfrac{m_2}{M}RT_2$, адкуль $m_1 = \dfrac{p_1VM}{RT_1}$, $m_2 = \dfrac{p_2VM}{RT_2}$.

Тады $$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = \frac{\dfrac{VM}{R}\left(\dfrac{p_1}{T_1} - \dfrac{p_2}{T_2}\right)}{\dfrac{VMp_1}{RT_1}} = 1 - \frac{p_2T_1}{p_1T_2}.$$

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = 1 - \frac{1{,}52 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 280 \text{ К}}{2{,}84 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 300 \text{ К}} = 0{,}50.$$

Адказ: $\frac{m_1 - m_2}{m_1} = 0{,}50$.

Прыклад 3. На рысунку 22 прыведзены графік працэсу змянення стану некаторай масы ідэальнага газу. Як змяняліся параметры газу на ўчастках *1* → *2*, *2* → *3*, *3* → *1*? Адлюструйце гэты працэс у каардынатах (p, V) і (p, T).



Рыс. 22

Рашэнне. На ўчастку *1* → *2* аб'ём газу прама прапарцыянальны тэмпературы. Значыць, працэс пераходу газу са стану *1* у стан *2* з'яўляецца ізабарным. З графіка бачна, што ў стане *2* тэмпература і аб'ём газу большыя, чым у стане *1*. Значыць, у працэсе ізабарнага расшырэння некаторай масы газу са стану *1* у стан *2* тэмпература і аб'ём газу павялічыліся. Гэта можна запісаць такім чынам:

пераход *1* → *2*: $p = \text{const}$, $V\uparrow$, $T\uparrow$ ⇒
адбываецца ізабарнае награванне газу.

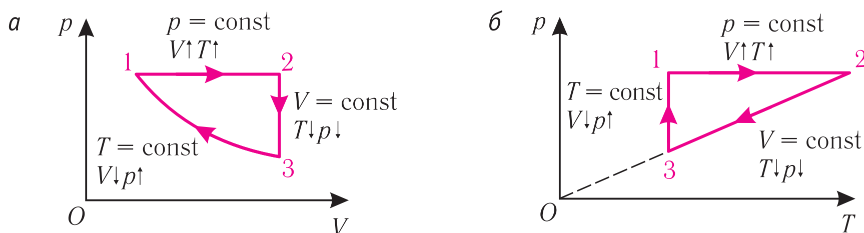
У працэсе пераходу газу са стану *2* у стан *3* застаецца пастаянным аб'ём (працэс ізахорны), а тэмпература газу змяншаецца. Непасрэдна з графіка не бачна, што будзе адбывацца з ціскам газу, але з суадносіны (5.6) вынікае, што пры ізахорным ахаладжэнні ціск газу змяншаецца прапарцыянальна яго тэмпературы. Таму можна запісаць:

пераход *2* → *3*: $V = \text{const}$, $T\downarrow$, $p\downarrow$ ⇒
адбываецца ізахорнае ахаладжэнне газу.

Працэс пераходу газу са стану *3* у стан *1* — ізатэрмічны. Пры гэтым аб'ём газу змяншаецца, што цягне за сабой, згодна з законам Бойля—Марыёта, павелічэнне ціску газу:

пераход *3* → *1*: $T = \text{const}$, $V\downarrow$, $p\uparrow$ ⇒
адбываецца ізатэрмічнае сцісканне газу.

На падставе зробленых вывадаў адлюструем усе тры працэсы ў каардынатах (p, V) і (p, T) (рыс. 23, *а*, *б*).



Рыс. 23

Практыкаванне 4

1. Вызначце колькасць молей ідэальнага газу, які знаходзіцца ў пасудзіне ўмяшчальнасцю $V = 480$ см^3 пры нармальных умовах.

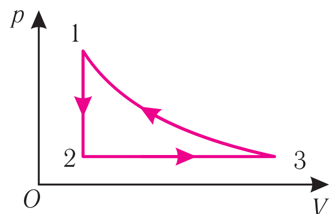
2. У пасудзіне ўмяшчальнасцю $V = 2{,}0$ л знаходзяцца кісларод масай $m_1 = 4{,}0$ г і азот масай $m_2 = 7{,}0$ г. Вызначце ціск сумесі газаў, калі яе тэмпература $T = 300$ К.

3. Балон умяшчальнасцю $V_1 = 15$ л, дзе знаходзіцца газ, ціск якога $p_1 = 2{,}0 \cdot 10^6$ Па, злучылі з пустым балонам умяшчальнасцю $V_2 = 5{,}0$ л. Вызначце ціск газу пасля таго, як у балонах усталявалася тэмпература, што была ў першым балоне.

4. Пры ізабарным павелічэнні тэмпературы ідэальнага газу, які знаходзіцца ў герметычна закрытым цыліндры, на $\Delta T = 60{,}0$ К яго аб'ём павялічыўся ў $\beta = 1{,}21$ раза. Вызначце пачатковую тэмпературу газу.

5. Адлюструйце графічна працэс ізабарнага ахаладжэння пэўнай масы ідэальнага газу ў каардынатах (p, T); (V, T); (V, p).

6. Ідэальны газ пэўнай масы спачатку ізабарна расшырылі, а затым ізатэрмічна сціснулі да першапачатковага аб'ёму. Адлюструйце графічна гэтыя працэсы ў каардынатах (V, T); (p, V).



Рыс. 24

7. На рысунку 24 прыведзены графік змянення стану пэўнай масы ідэальнага газу. (Пераход *3*→*1* ажыццяўляецца пры пастаяннай тэмпературы.) Адлюструйце графічна гэты працэс у каардынатах (T, V) і (p, T).

8. Азот, аб'ём якога $V_1 = 2{,}9$ м^3, тэмпература $T_1 = 293$ К і ціск $p_1 = 2{,}0 \cdot 10^5$ Па, перавялі ў вадкі стан. Вызначце аб'ём, які займае вадкі азот, калі яго шчыльнасць $\rho = 0{,}86 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

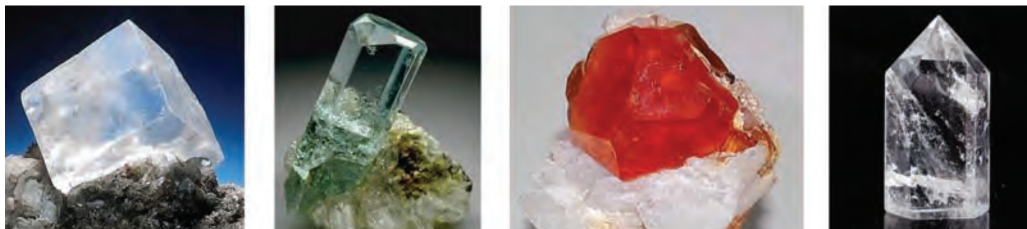
9. Пры тэмпературы $t_1 = -3{,}0$ °C манометр на балоне са сціснутым кіслародам паказваў ціск $p_1 = 1{,}8 \cdot 10^6$ Па, а пры тэмпературы $t_2 = 27$ °C — ціск $p_2 = 2{,}0 \cdot 10^6$ Па. Вызначце, ці была ўцечка газу з балона.

10*. Ідэальны газ, ціск якога $p_1 = 4{,}0 \cdot 10^5$ Па, займаў аб'ём $V_1 = 2{,}0$ л. Спачатку газ ізатэрмічна расшырылі да аб'ёму $V_2 = 8{,}0$ л, а затым ізахорна нагрэлі, у выніку чаго яго тэмпература павялічылася ў тры разы. Вызначце ціск газу ў канцы працэсу, калі пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы маса газу заставалася пастаяннай.

§ 6. Будова і ўласцівасці цвёрдых цел

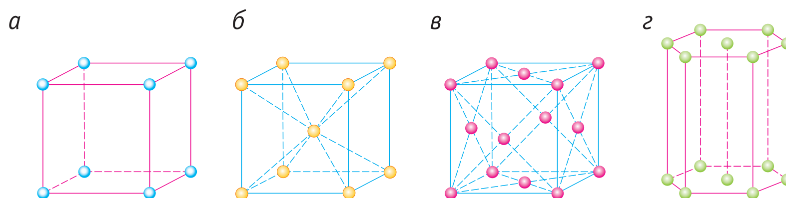
У паўсядзённым жыцці мы лічым цвёрдым любое цела, якое захоўвае форму і аб'ём пры адсутнасці знешніх уздзеянняў. Напрыклад, мы лічым цвёрдымі целы, выробленыя з металаў, пластмасы, лёду, шкла. Цвёрдыя целы дзеляць на дзве групы, якія адрозніваюцца па сваіх уласцівасцях: крышталічныя і аморфныя. Да крышталічных цел адносяць мінералы, напрыклад павараную соль, медны купарвас (сульфат медзі(II)), кварц, горны хрусталь, і металы ў цвёрдым стане; да аморфных цел — апал, абсідыян, эбаніт, сургуч, шкло, розныя пластмасы, смолы (вар, каніфоль, янтар) і інш. У чым адрозненне паміж крышталічнымі і аморфнымі цвёрдымі целамі?

Крышталі. *Крышталямі* называюць такія цвёрдыя целы, атамы, іоны або малекулы якіх выконваюць цеплавыя ваганні каля пэўных, упарадкаваных у прасторы становішчаў раўнавагі. Упарадкаванае размяшчэнне часціц цвёрдага крышталічнага цела абумоўлівае яго правільную геаметрычную форму, у выніку чаго паверхня крышталя ўтворана плоскімі гранямі (рыс. 25).



Рыс. 25

Часціцы крышталя ўтрымліваюцца на пэўнай усярэдненай адлегласці адна ад другой (~ 0,1 нм) сіламі міжатамнага і міжмалекулярнага ўзаемадзеяння. Нягледзячы на цеплавыя ваганні, яны ўтвараюць упарадкаваную прасторавую структуру, геаметрычнай выявай якой з'яўляецца крышталічная рашотка. Вузлы крышталічнай рашоткі — гэта становішчы ўстойлівай раўнавагі вагальных часціц (іонаў, атамаў або малекул), з якіх складаецца крышталь. Асновай будовы крышталя з'яўляецца так званая элементарная крышталічная ячэйка — мнагаграннік найменшых памераў, паслядоўным пераносам якога разам з часціцамі, што знаходзяцца ўнутры гэтага мнагагранніка, можна пабудаваць увесь крышталь. На рысунку 26 паказаны самыя простыя элементарныя ячэйкі: кубічныя (*а* — прымітыўная, *б* — аб'ёмна-цэнтраваная, *в* — гранецэнтраваная) і гексаганальная прызма (*г*).



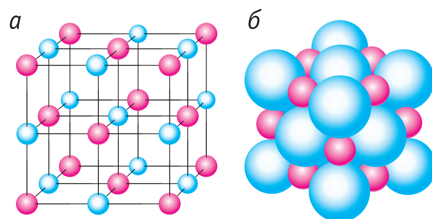
Рыс. 26

У крышталічных целах упарадкаванае размяшчэнне часціц паўтараецца ва ўсім аб'ёме крышталя, таму гавораць, што ў крышталі існуе *далёкі парадак* у размяшчэнні часціц.

У залежнасці ад віду часціц, з якіх складаецца крышталь, і ад характару сіл узаемадзеяння паміж імі адрозніваюць чатыры асноўныя тыпы крышталёў: *іонныя, атамныя, металічныя* і *малекулярныя*. У вузлах іоннай крышталічнай рашоткі размешчаны дадатна і адмоўна зараджаныя іоны, якія звязаны паміж сабой электрастатычнымі сіламі. Тыповым прыкладам іоннага крышталя з'яўляецца крышталь паваранай солі (хларыду натрыю $NaCl$) (рыс. 27). Крышталі з іоннай рашоткай тугаплаўкія і валодаюць высокай цвёрдасцю.

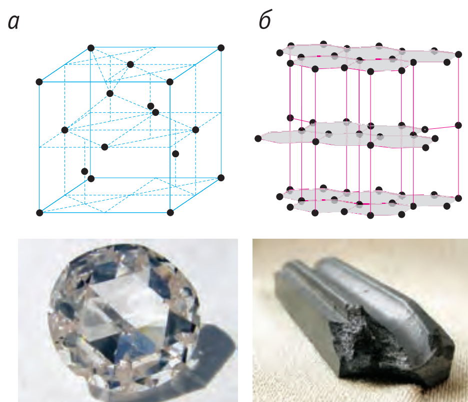
У вузлах атамнай крышталічнай рашоткі знаходзяцца нейтральныя атамы. Сувязь паміж атамамі ажыццяўляецца электроннымі парамі — па адным валентным электроне ад кожнага атама. Прыкладам атамных крышталёў з'яўляюцца алмаз і графіт. Гэтыя крышталі тоесныя па хімічнай прыродзе (яны складаюцца з атамаў вугляроду), але адрозніваюцца па сваёй будове (рыс. 28). Гэта істотна ўплывае на іх уласцівасці: алмаз — цвёрды мінерал (гл. рыс. 28, *а*), а графіт — наадварот, мяккі і крохкі (гл. рыс. 28, *б*).

У вузлах крышталічнай рашоткі металаў знаходзяцца дадатныя іоны, напрыклад, палонію Po (рыс. 26, *а*), жалеза Fe (рыс. 26, *б*), серабра Ag (рыс. 26, *в*), магнію Mg (рыс. 26, *г*). Паміж іонамі, якія вагаюцца адносна станаў устойлівай раўнавагі, бесперапынна рухаюцца свабодныя электроны.

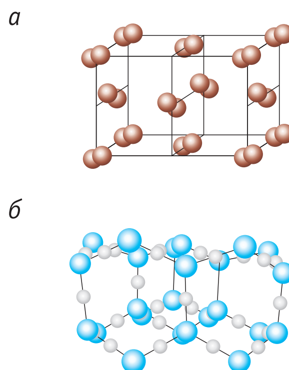


Рыс. 27

У вузлах малекулярных крышталічных рашотак знаходзяцца малекулы. Большасць простых рэчываў неметалаў у цвёрдым стане, напрыклад ёд I_2 (рыс. 29, *а*), вадарод H_2, кісларод O_2, і іх злучэнню адзін з адным, напрыклад лёд H_2O (рыс. 29, *б*), а таксама практычна ўсе цвёрдыя арганічныя рэчывы ўтвараюць малекулярныя крышталі.



Рыс. 28



Рыс. 29

Цвёрдыя целы, якія маюць ва ўсім аб'ёме адзіную крышталічную рашотку, называюць *монакрышталямі*. Гэта адзінкавыя крышталі, якія могуць мець даволі значныя памеры (сустракаюцца крышталі горнага хрусталю, памеры якіх сувымерныя з ростам чалавека). Многія цвёрдыя целы складаюцца з вялікай колькасці маленькіх крышталёў, што зрасліся паміж сабой. Такія цвёрдыя целы называюць *полікрышталямі*. Вы самі можаце ў дамашніх умовах вырасціць монакрышталі (рыс. 30, *а*) і полікрышталі (рыс. 30, *б*) меднага купарвасу (сульфату медзі(II) $CuSO_4$).

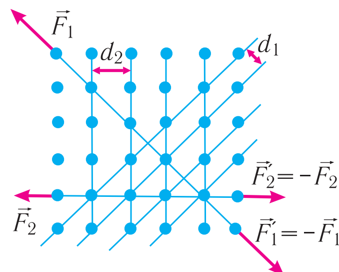
Характэрнай асаблівасцю монакрышталёў з'яўляецца іх анізатрапія, г. зн. залежнасць фізічных уласцівасцей (механічных, цеплавых, электрычных, аптычных) ад напрамку. Анізатрапія монакрышталёў абумоўлена ўзаемадзеяннем

часціц і іх упарадкаваным размяшчэннем. На рысунку 31 паказана, што адлегласці паміж атамнымі плоскасцямі ў крышталі неаднолькавыя ($d_1 < d_2$). Таму, у прыватнасці, адрозніваюцца будуць і модулі сіл, неабходных для яго разрыву ($F_1 > F_2$).

а

б

Рыс. 30

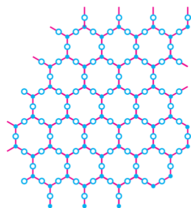


Рыс. 31

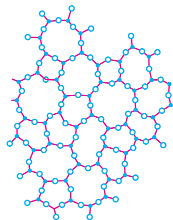
У адрозненне ад монакрышталёў полікрышталі ізатропныя, г. зн. іх уласцівасці аднолькавыя па ўсіх напрамках. Гэта вынік таго, што полікрышталь складаецца з вялікай колькасці хаатычна арыентаваных маленькіх монакрышталёў.

Аморфныя целы. *Аморфны стан* (ад грэч. *amorphous* — бясформенны) — цвёрды некрышталічны стан рэчыва, які характарызуецца ізатрапіяй уласцівасцей і адсутнасцю пэўнай тэмпературы плаўлення. Пры павышэнні тэмпературы аморфнае рэчыва размякчаецца і паступова пераходзіць ў вадкі стан. У аморфным стане адсутнічае строгі парадак ў размяшчэнні атамаў і малекул. На рысунку 32 схематычна паказана будова крышталічнага кварцу (рыс. 32, *а*) і аморфнага кварцу (рыс. 32, *б*). Аморфны стан — бясформенны стан са слаба выяўленай цякучасцю. Аморфныя целы называюць пераахалоджанымі вадкасцямі, паколькі ў іх, як і ў вадкасцей, існуе толькі бліжні парадак размяшчэння часціц.

а



б



Рыс. 32

Аморфныя целы пры пэўных умовах могуць крышталізавацца. Цукар-пясок з'яўляецца крышталічным целам. Калі яго расплавіць, то, застываючы, ён ператвараецца ў празрысты шклопадобны ледзянец, які з'яўляецца аморфным целам. Праз некаторы прамежак часу ледзянец зацукроўваецца, г. зн. зноў робіцца крышталічным.

Пры скарасцях ахаладжэння, якія перавышаюць мільён градусаў у секунду, удалося атрымаць аморфныя

металічныя сплавы — шклопадобныя металы. Аморфны метал надзвычай цвёрды і трывалы. Яго выкарыстоўваюць у якасці рэжучага інструмента. Ён валодае высокімі магнітнымі ўласцівасцямі, таму з'яўляецца незаменным пры вырабе магнітных галовак для гука- і відэазапісу. Акрамя таго, аморфныя металы валодаюць высокай антыкаразійнай устойлівасцю.

1. Цвёрдыя целы дзеляць на дзве групы, які адрозніваюцца па сваіх уласцівасцях: крышталічныя і аморфныя.

2. Атамы, іоны або малекулы ў цвёрдых крышталічных целах здзяйсняюць цеплавыя ваганні каля пэўных, упарадкаваных у прасторы становішчаў раўнавагі.

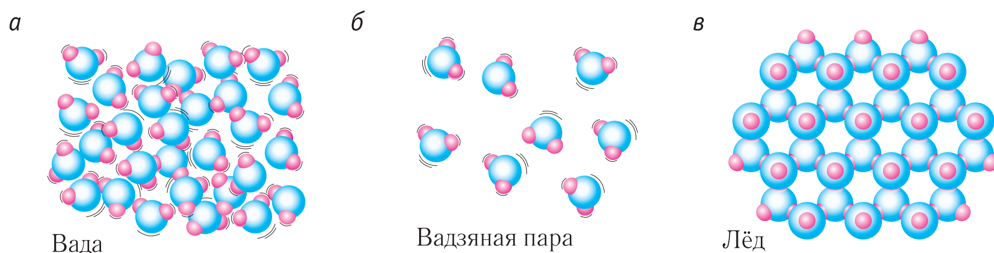
3. Монакрышталічным целам уласціва анізатрапія, г. зн. залежнасць фізічных уласцівасцей ад напрамку. Полікрышталічныя целы ізатропныя, г. зн. іх фізічныя ўласцівасці аднолькавыя па ўсіх напрамках.

4. Аморфны стан — цвёрды некрышталічны стан рэчыва, які характарызуецца ізатрапіяй уласцівасцей і адсутнасцю пэўнай тэмпературы плаўлення.

1. Якія целы называюць цвёрдымі?
2. Якія асаблівасці будовы крышталічных цвёрдых цел?
3. У чым адрозненне паміж мона- і полікрышталямі?
4. Якія тыпы крышталёў вы ведаеце? Чым яны адрозніваюцца адзін ад аднаго?
5. Чым адрозніваюцца асноўныя фізічныя ўласцівасці крышталічных і аморфных цел?

§ 7. Будова і ўласцівасці вадкасцей. Паверхневае нацяжэнне

Сярэдняя адлегласць паміж малекуламі рэчыва ў вадкім стане (рыс. 33, а) меншая за сярэднюю адлегласць паміж малекуламі гэтага ж рэчыва ў газападобным стане (рыс. 33, б). Яна роўная прыблізна аднаму-двум дыяметрам малекулы. Гэта вядзе да таго, што шчыльнасць вадкасці прыблізна ў 10^3 разоў перавышае шчыльнасць пары, якая знаходзіцца ў дынамічнай раўнавазе з вадкасцю (насычаная пара). Напрыклад, шчыльнасць вады пры тэмпературы 100 ^oC у $1{,}67 \cdot 10^3$ разоў большая за шчыльнасць насычанай вадзяной пары. Уласцівасці вадкасцей залежаць як ад асаблівасцей руху малекул, так і ад узаемадзеяння паміж імі.



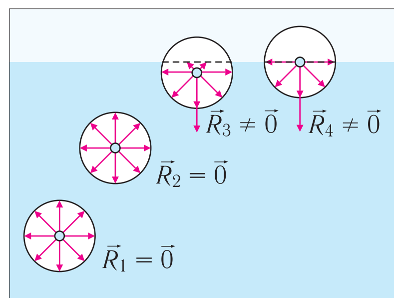
Рыс. 33

Будова і ўласцівасці вадкасцей. У доследах па рассейванні рэнтгенаўскіх прамянёў у вадкасцях выяўлены бліжні парадак у размяшчэнні часціц (гл. рыс. 33, *а*). У адрозненне ад цвёрдых цел (рыс. 33, *в*) у вадкасцях упарадкаванасць у размяшчэнні малекул захоўваецца толькі сярод бліжэйшых суседзяў (на адлегласцях, роўных некалькім дыяметрам малекул) і спалучаецца з бесперапыннымі і хаатычнымі ваганнямі каля становішчаў раўнавагі. Сярэдняя кінетычная энергія ваганняў малекул вызначае тэмпературу вадкасці. Малекулы, якія атрымалі дадатковую энергію ў выніку сутыкненняў з іншымі малекуламі, могуць “пераскочыць” у новае становішча раўнавагі. Такім чынам, бліжні парадак у вадкасці пастаянна парушаецца ў выніку цеплавога руху малекул і зноў утвараецца сіламі малекулярнага ўзаемадзеяння.

Сувымернасць адлегласці паміж малекуламі вадкасці з іх уласнымі памерамі і магчымасць малекул адносна свабодна перамяшчацца абумоўліваюць уласцівасці вадкасцей. Вадкасці, як і цвёрдыя целы, практычна несціскальныя, але яны цякучыя, таму іх форма вызначаецца формай дадзенай ім пасудзіны. На форму вадкасці ўплываюць знешнія сілы (напрыклад, сіла цяжару сумесна з сіламі рэакцыі дна і сценак пасудзіны, у якой знаходзіцца вадкасць) і сілы паверхневага нацяжэння.

Паверхневае нацяжэнне. Разгледзім з’явы, якія адбываюцца на мяжы падзелу вадкасці з паветрам або з яе парай. Сваім узнікненнем гэтыя з’явы абавязаны асаблівым фізічным умовам, у якіх знаходзяцца малекулы паверхневага слоя вадкасці.

У паверхневым слоі вадкасці праяўляецца нескампенсаванасць малекулярных сіл прыцяжэння. На самай справе, любая малекула ўнутры вадкасці з усіх бакоў акружана суседнімі (аднолькавымі) малекуламі, дзеянне якіх узаемна кампенсуецца (рыс. 34). Таму тут малекулярныя сілы прыцяжэння ўраўнаваж-



Рыс. 34

ваюцца і раўнадзейная гэтых сіл роўная нулю. Паколькі канцэнтрацыя малекул у паветры (пары) значна меншая, чым у вадкасці, то раўнадзейная сіл прыцяжэння кожнай малекулы паверхневага слоя да малекул газу меншая за раўнадзейную сіл яе прыцяжэння да малекул вадкасці. Такім чынам, раўнадзейныя сіл прыцяжэння, якія дзейнічаюць на малекулы паверхневага слоя, накіраваны ўнутр вадкасці. У выніку дзеяння гэтых сіл малекулы паверхневага слоя ўцягваюцца ўнутр, колькасць малекул на паверхні памяншаецца і плошча паверхні вадкасці скарачаецца да пэўнай велічыні.

Таўшчыня паверхневага слоя, у якім праяўляецца нескампенсаванасць сіл малекулярнага прыцяжэння, роўная прыблізна радыусу сферы малекулярнага дзеяння (~1 нм). Пад уздзеяннем сіл прыцяжэння і ў выніку цякучасці вадкасці на яе паверхні застаецца такая колькасць малекул, пры якой плошча паверхні мінімальная для дадзенага аб'ёму вадкасці. Працэс скарачэння плошчы паверхні на гэтым спыняецца, вадкасць пераходзіць у стан раўнавагі. У гэтым стане сілы прыцяжэння малекул паверхневага слоя, накіраваныя ўнутр вадкасці, ураўнаважваюцца сіламі адштурхвання, якія ўзніклі пры збліжэнні малекул паверхневага слоя з малекуламі ўнутры вадкасці, выкліканым яе сцісканнем.

Каб перамясціць малекулу, размешчаную ўнутры вадкасці, на паверхню (павялічыць плошчу паверхні вадкасці), неабходна выканаць работу супраць сіл узаемадзеяння гэтай малекулы з малекуламі паверхневага слоя вадкасці. Значыць, малекулы, якія ўтвараюць паверхневы слой вадкасц, валодаюць залішняй патэнцыяльнай энергіяй у параўнанні з малекуламі, што знаходзяцца ўнутры вадкасці. Гэту энергію называюць паверхневай энергіяй.

Паколькі патэнцыяльная энергія цела (сістэмы цел) у стане ўстойлівай раўнавагі мінімальная, то наяўнасць паверхневай энергіі $E_{\text{пав}}$ у вадкасці абумоўлівае яе імкненне да скарачэння плошчы S сваёй паверхні. Работу знешніх сіл па павелічэнні плошчы паверхні вадкасці на адзінку плошчы пры захаванні аб'ёму і тэмпературы вадкасці нязменнымі называюць *каэфіцыентам паверхневага нацяжэння* σ або, коратка, *паверхневым нацяжэннем*. Гэту фізічную скалярную велічыню можна вызначыць па формуле

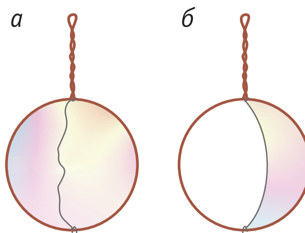
$$\sigma = \frac{E_{\text{пав}}}{S}. \quad (7.1)$$

Мінімальную плошчу паверхні пры дадзеным аб'ёме маюць шарападобныя целы. Напрыклад, кроплі вадкасці пры судакрананні зліваюцца ў адну, форма якой адрозніваецца ад сферычнай толькі з-за дзеяння сілы цяжару і сілы рэакцыі апоры. Чым меншы радыус кроплі, тым большую ролю адыгрывае паверхневая энергія ў параўнанні з патэнцыяльнай энергіяй кроплі ў гравітацыйным полі Зямлі і тым бліжэй форма кропель вадкасці на апоры да сферычнай. Таму маленькія кропелькі расы на лістах раслін набываюць форму, блізкую да шарападобнай (рыс. 35).

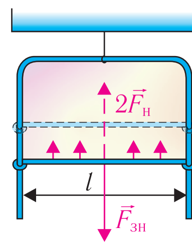
Разгледзім наступны дослед. Апусцім кальцо з дроту з прывязанай да яго ніткай у мыльны раствор. Контур кальца, вынутага з раствору, зацягнуты мыльнай плёнкай, а нітка ў ёй размяшчаецца выпадковым чынам (рыс. 36, *а*). Калі пракалоць плёнку з аднаго боку ніткі, то астатняя частка плёнкі скароціцца так, што плошча яе паверхні стане мінімальнай (рыс. 36, *б*). Нітка ўтрымліваецца ў нацягнутым стане сіламі, якія атрымалі назву *сіл паверхневага нацяжэння*. Яны накіраваны па датычных да свабодных паверхняў плёнкі перпендыкулярна да лініі, якая абмяжоўвае гэтыя паверхні.

Разгледзім яшчэ адзін дослед. Прамавугольную рамку з рухомай перакладзінай даўжынёй l апусцім у мыльны раствор. Пасля вымання рамкі з раствору бачым, што перакладзіна перамяшчаецца, бо мыльная плёнка імкнецца скараціць плошчу сваёй паверхні. Каб утрымаць перакладзіну ў раўнавазе, да яе трэба прыкласці сілу $\vec{F}_{\text{зн}}$, якая ўраўнаважыць сілы паверхневага нацяжэння, што дзейнічаюць на кожнай з дзвюх паверхняў плёнкі: $\vec{F}_{\text{зн}} = \vec{F}_{\text{н}_1} + \vec{F}_{\text{н}_2} = 2\vec{F}_{\text{н}}$, паколькі $\vec{F}_{\text{н}_1} = \vec{F}_{\text{н}_2} = \vec{F}_{\text{н}}$ (рыс. 37). Калі праводзіць доследы з рамкамі розных памераў, то можна выявіць, што адносіна $\frac{F_{\text{н}}}{l}$ для плёнкі

Рыс. 35



Рыс. 36



Рыс. 37

дадзенай вадкасці пры фіксаванай тэмпературы заўсёды аднолькавая. Значыць, гэту адносіну можна ўзяць у якасці характарыстыкі паверхневага слоя вадкасці:

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}.$$

Паверхневае нацяжэнне σ лікава роўнае адносіне модуля сілы паверхневага нацяжэння $F_{\text{н}}$, якая дзейнічае на прамалінейны ўчастак мяжы паверхневага слоя вадкасці, да даўжыні l гэтага ўчастка.

Сілавое вызначэнне паверхневага нацяжэння дапаўняе энергетычнае. Адзінкай паверхневага нацяжэння ў СІ з'яўляецца джоўль на метр у квадраце $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}\right)$ або ньютан на метр $\left(\frac{\text{Н}}{\text{м}}\right)$. Пакажыце самастойна, што $1\ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

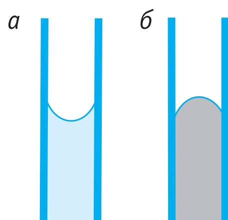
Паверхневае нацяжэнне залежыць ад роду вадкасці і таго асяроддзя, з якім яна мяжуе, наяўнасці раствораных у вадкасці іншых рэчываў і ад яе тэмпературы. Павышэнне тэмпературы вадкасці, дабаўленне ў яе так званых паверхнева-актыўных рэчываў (мыла, тлустыя кіслоты) выклікае памяншэнне паверхневага нацяжэння. Надзвычай разнастайныя праяўленні сіл паверхневага нацяжэння вадкасці ў прыродзе і тэхніцы. Паверхневае нацяжэнне — прычына таго, што вада збіраецца ў кроплі (рыс. 38), утвараюцца мыльныя пузыры (рыс. 39), жук-вадамер рухаецца на паверхні вады (рыс. 40), а ў стане бязважкасці любы аб'ём вадкасці прымае сферычную форму.

Рыс. 38

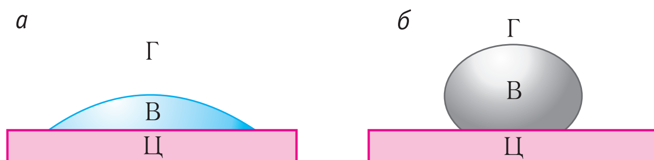
Рыс. 39

Рыс. 40

Змочванне. На мяжы судакранання цвёрдых цел, вадкасцей і газаў назіраецца *з'ява змочвання* або *нязмочвання*. Яна з'яўляецца вынікам узаемадзеяння малекул вадкасці, цвёрдага цела і газаў, якое вядзе да скрыўлення паверхні вадкасці каля паверхні цвёрдага цела на мяжы з газам. Пры кантакце вадкасці з цвёрдым целам магчымы выпадкі, калі вадкасць змочвае (часткова або цалкам) або не змочвае (часткова або цалкам) яго. Так, ртуць добра змочвае чыстыя паверхні металаў і не змочвае чыстае шкло. Вада добра змочвае чыстае шкло і не змочвае тлустыя паверхні.



Рыс. 41



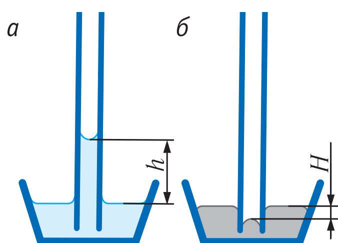
Рыс. 42

Свабодная паверхня вадкасці на мяжы з цвёрдым целам скрыўляецца, утвараючы *меніск*. Калі вадкасць змочвае паверхню цела, утвараецца ўвагнуты меніск (рыс. 41, *а*), калі не змочвае — выпуклы меніск (рыс. 41, *б*). На мяжы судакранання трох асяроддзяў — цвёрдага, вадкага і газападобнага — вадкасць набывае такую форму, пры якой сума патэнцыяльнай энергіі вадкасці ў гравітацыйным полі Зямлі і паверхневай энергіі ўсіх цел мінімальная (цвёрдыя целы таксама валодаюць паверхневай энергіяй). Паверхневае нацяжэнне на мяжы цвёрдага цела і вадкасці абазначаюць $\sigma_{цв}$, на мяжы цвёрдага цела і газу — $\sigma_{цг}$, на мяжы вадкасці і газу — $\sigma_{вг}$. Калі $\sigma_{цг} \geq \sigma_{цв} + \sigma_{вг}$, то вадкасць цалкам змочвае паверхню цвёрдага цела, пакрываючы яго тонкай плёнкай. Калі $\sigma_{цв} \geq \sigma_{цг} + \sigma_{вг}$, то вадкасць цалкам не змочвае паверхню цвёрдага цела, сцягнуўшыся ў кроплю, трохі сплюшчаную дзеяннем сілы цяжару і сілы рэакцыі апоры. У большасці выпадкаў мае месца частковае змочванне (рыс. 42, *а*) або частковае нязмочванне (рыс. 42, *б*).

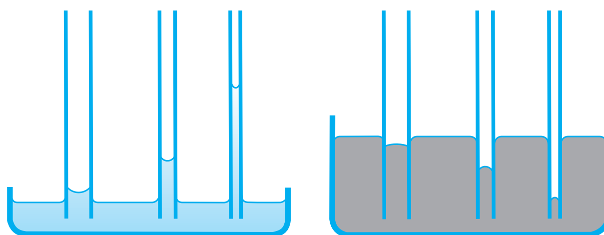
З'ява змочвання выкарыстоўваецца ў прамысловасці і быце. Добрае змочванне неабходна пры афарбоўцы і мыцці розных тканін, нанясенні лакафарбавых пакрыццяў і г. д. На з'яве змочвання заснавана склейванне розных вырабаў. Пакрыццё металічных рэчаў масленай плёнкай для аховы іх ад карозіі мае ў аснове з'яву нязмочвання вадой тлустых паверхняў. Непрамакальнае адзенне вырабляюць з тканін, якія не змочваюцца вадой. З уласцівасцю змоч-

вання звязана паянне металаў. Каб расплаўлены прыпой добра расцякаўся на паверхні металічных вырабаў і прыліпаў да іх, трэба гэтыя паверхні ачысціць ад тлушчу, пылу і аксіднай плёнкі.

Капілярныя з'явы. Пад *капілярнымі з'явамі* разумеюць з'явы пад'ёму або апускання вадкасці ў вузкіх трубках, якія называюцца капілярамі. Калі вадкасць змочвае сценкі капіляра, то пасля яго апускання ў пасудзіну з гэтай вадкасцю ўзровень вадкасці ў капіляры будзе вышэйшы, чым у пасудзіне (рыс. 43, *а*). Пры нязмочванні ўзровень вадкасці ў капіляры ўсталёўваецца ніжэй за ўзровень вадкасці ў пасудзіне (рыс. 43, *б*). Такая з'ява называецца, напрыклад, пры апусканні шклянога капіляра ў пасудзіну з ртуццю.



Рыс. 43



Рыс. 44

Вышыня пад'ёму (апускання) вадкасці ў капіляры залежыць ад уласцівасцей вадкасці і радыуса капіляра (рыс. 44). Калі вадкасць цалкам змочвае капіляр, то вышыню пад'ёму вадкасці ў капіляры вызначаюць па формуле

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r},$$

дзе r — унутраны радыус капіляра, σ — паверхневае нацяжэнне вадкасці, ρ — шчыльнасць вадкасці. Калі вадкасць цалкам не змочвае капіляр, то h — глыбіня, на якую апускаецца вадкасць у капіляры.

Капілярныя з'явы маюць важнае значэнне ў прыродзе і тэхніцы. Так, ствол, галіны, сцябло і лісце раслін пранізаны мноствам капілярных каналаў, па якіх паступаюць пажыўныя рэчывы. Па капілярах у глебе грунтавыя воды паднімаюцца да каранёвай сістэмы раслін. Дробныя крывяносныя сасуды чалавека і жывёл можна таксама разглядаць як капіляры. Капілярныя з'явы часта сустракаюцца і ў быце. Ручнікі добра ўбіраюць у сябе ваду пры выціранні, у аўтаручцы чарніла ідзе да пяра па капіляры. Каб пазбегнуць намакання скуранога абутку, яго насычаюць тлустым гуталінам. Капілярныя з'явы ляжаць у аснове мноства тэхнічных працэсаў: пры змазцы дэталей

машын і механізмаў прымяняюць кнотавы спосаб; пры афарбоўцы скуры і тканін фарба запаўняе капіляры вырабу; пры будаўніцтве дамоў падмурак аддзяляюць ад сцен рубероідам або бітумам, каб пазбегнуць капілярнага пад'ёму вады з глебы.

1. Сувымернасць адлегласці паміж малекуламі вадкасці з іх уласнымі памерамі і рухомасць малекул вызначаюць уласцівасці вадкасцей: малую залежнасць аб'ёму вадкасці ад ціску і яе цякучасць.

2. Работу знешніх сіл па павелічэнні плошчы паверхні вадкасці на адзінку плошчы пры захаванні аб'ёму і тэмпературы вадкасці нязменнымі называюць каэфіцыентам паверхневага нацяжэння (паверхневым нацяжэннем):

$$\sigma = \frac{E_{\text{пав}}}{S}.$$

3. Сілы паверхневага нацяжэння накіраваны па датычнай да свабоднай паверхні вадкасці і імкнуцца скараціць гэту паверхню да мінімуму.

4. Паверхневае нацяжэнне лікава роўнае адносіне модуля сілы паверхневага нацяжэння, якая дзейнічае на прамалінейны ўчастак мяжы паверхневага слоя вадкасці, да даўжыні гэтага ўчастка:

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}.$$

5. Вышыня пад'ёму (апускання) вадкасці ў капіляры залежыць ад паверхневага нацяжэння вадкасці, шчыльнасці вадкасці і ўнутранага радыуса капіляра:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

1. Якімі асаблівасцямі будовы вадкасцей вызначаюцца іх уласцівасці?

2. Якія асаблівасці паверхневага слоя вадкасцей?

3. Як вызначаюць паверхневае нацяжэнне вадкасці?

4. Чым выклікана скрыўленне паверхні вадкасці паблізу сценак пасудзіны?

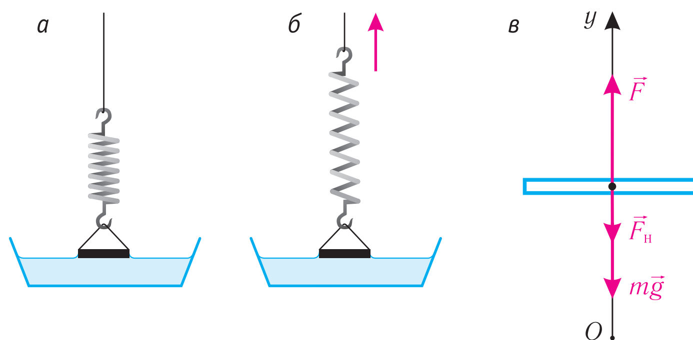
5. Чаму кропля вады або алею расцякаецца па паверхні дрэва, а кропля ртуці не расцякаецца?

6. Што разумеюць пад капілярнымі з'явамі? Ад чаго залежыць вышыня пад'ёму (апускання) вадкасці ў капілярах?

7. Вясной зямлю ўзворваюць і барануюць. Растлумачце, чаму гэта садзейнічае захаванню вільгаці ў глебе.

Прыклад рашэння задачы

Танкасценнае кальцо масай $m = 8{,}0$ г і радыусам $r = 10$ см судакранаецца з мыльным растворам (рыс. 45, *а*). Кальцо выраблена з матэрыялу, які добра змочваецца мыльным растворам. Вызначце модуль сілы, з якой трэба дзейнічаць на кальцо, каб адарваць яго ад паверхні раствору (рыс. 45, *б*). Паверхневае нацяжэнне мыльнага раствору $\sigma = 4{,}0 \cdot 10^{-2}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.



Рыс. 45

Дадзена:
$m = 8{,}0$ г $= 8{,}0 \cdot 10^{-3}$ кг
$r = 10$ см $= 0{,}10$ м
$\sigma = 4{,}0 \cdot 10^{-2}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

F — ?

Рашэнне. У момант адрыву ад паверхні раствору на кальцо дзейнічае шукаемая сіла $\vec{F}$, сіла цяжару $m\vec{g}$ і сіла паверхневага нацяжэння $\vec{F}_\text{н}$ (рыс. 45, *в*). «Разрэжам» паверхню вадкай плёнкі, якая цягнецца ад раствору да кальца, уяўнай гарызантальнай паверхняй. Ніжняя частка плёнкі мяжуе з верхняй па кальцы, абмежаваным дзвюма акружнасцямі — унутранай і знешняй, агульная даўжыня якіх блізкая да $4\pi r$. Модуль сілы паверхневага нацяжэння вызначым па формуле

$$F_\text{н} = 4\pi r\sigma.$$

Умова раўнавагі кальца ў праекцыі на вось Oy у момант яго адрыву ад раствору, як бачна з рысунка 45, *в*, мае выгляд

$$F = mg + F_\text{н} \text{ або } F = mg + 4\pi r\sigma.$$

$$F = 8{,}0 \cdot 10^{-3}\ \text{кг} \cdot 9{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} + 4 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}10\ \text{м} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-2}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 0{,}13\ \text{Н}.$$

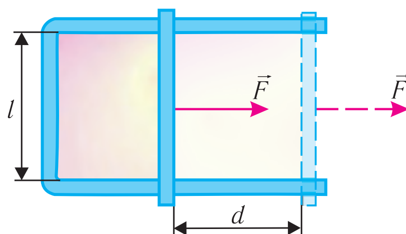
Адказ: $F = 0{,}13$ Н.

Практыкаванне 5

1. Чаму перад афарбоўваннем паверхні папярэдне грунтуюць — пакрываюць аліфай?

2. Чаму пры паянні волавам або алавяным прыпоем паверхню металу старанна зачышчаюць?

3. Рамка з дроту з рухомай перакладзінай зацягнута мыльнай плёнкай. Вызначце модуль сілы, якая дзейнічае з боку мыльнай плёнкі на перакладзіну даўжынёй $l = 15$ см. Якую работу па пераадоленні сіл паверхневага нацяжэння трэба выканаць, каб перамясціць перакладзіну на адлегласць $d = 8{,}0$ см (рыс. 46)? Паверхневае нацяжэнне раствору $\sigma = 4{,}0 \cdot 10^{-2}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.



Рыс. 46

4. Ці можна пакласці стальную іголку даўжынёй $l = 3{,}5$ см і масай $m = 0{,}10$ г на паверхню вады так, каб яна не патанула? Паверхневае нацяжэнне вады $\sigma = 7{,}3 \cdot 10^{-2}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

5. Вызначце модуль сілы, якая дадаткова дзейнічае на адчувальныя вагі з-за таго, што вада змочвае дроцік дыяметрам $d = 0{,}12$ мм, падвешаны вертыкальна да чашы вагаў і часткова апушчаны ў пасудзіну з вадой. Паверхневае нацяжэнне вады $\sigma = 7{,}3 \cdot 10^{-2}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

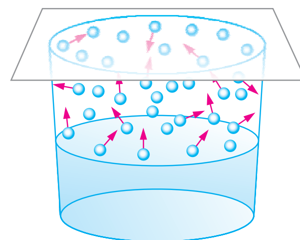
6. З піпеткі, дыяметр адтуліны якой $d = 1{,}8$ мм, выцекла $N = 24$ кроплі вады. Вызначце аб'ём вады, што выцекла з піпеткі. Паверхневае нацяжэнне вады $\sigma = 7{,}3 \cdot 10^{-2}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

§ 8. Выпарэнне і кандэнсацыя. Насычаная пара. Вільготнасць паветра

З паўсядзённага вопыту мы ведаем, што вадкасці, напрыклад вада, знаходзячыся ў адкрытых пасудзінах, з цягам часу пераходзяць у газападобны стан — выпарваюцца. Прычым хуткасць выпарэння залежыць ад роду вадкасці, яе тэмпературы, плошчы свабоднай паверхні і ад

прытоку паветра. У выніку выпарэння вады з паверхні вадзяной абалонкі Зямлі — гідрасферы, з паверхні глебы і раслiннага покрыва ў паветры заўсёды знаходзіцца вадзяная пара, якая можа кандэнсавацца, утвараць воблакі, вяртацца на зямлю ў выглядзе ападкаў. Працэсы выпарэння і кандэнсацыі распаўсюджаны ў прыродзе і тэхніцы, і вывучэнне іх асаблівасцей мае вялікае практычнае значэнне.

Выпарэнне і кандэнсацыя. Разгледзім пасудзіну, якую часткова запоўнілі вадой і шчыльна закрылі. У пасудзіне адначасова адбываюцца два супрацьлегла накіраваныя працэсы — пераход вады ў газападобны стан (выпарэнне) і пераход вадзяной пары ў вадкасць (кандэнсацыя) (рыс. 47). На працягу некаторага прамежку часу пасля герметызацыі пасудзіны выпарэнне вадкасці пераважае над кандэнсацыяй яе пары. Калі энергія да сістэмы вадкасць—пара не паступае з навакольнага асяроддзя, то пры выпарэнні вадкасць ахалоджваецца. Гэта адбываецца ў выніку таго, што паверхневы слой вадкасці пакідаюць малекулы, якія валодаюць найбольшай скорасцю і, адпаведна, кінетычнай энергіяй цеплавога руху, што дазваляе ім пераадолець сілы прыцяжэння, якія дзейнічаюць у вадкасці. Таму скорасць малекул, якія вылятаюць з вадкасці, змяншаецца, а скорасць малекул, якія ўлятаюць у вадкасць, наадварот, павялічваецца. Такое змяненне скорасці, а значыць, і кінетычнай энергіі малекул, што перасякаюць паверхню вадкасці, дазваляе сістэме дасягнуць стану цеплавой раўнавагі, пры якой тэмпературы вадкасці і яе пары аднолькавыя.



Рыс. 47

Канцэнтрацыя малекул пары ўзрастае да таго часу, пакуль колькасць малекул, што пакідаюць вадкасць, не стане роўнай колькасці малекул, што вяртаюцца ў яе за такі ж прамежак часу. У гэтым выпадку гавораць, што паміж вадкасцю і парай усталяваўся стан *дынамічнай раўнавагі*. Ён будзе існаваць да таго часу, пакуль не зменіцца тэмпература або аб’ём сістэмы.

! Паветраная абалонка Зямлі — атмасфера — уяўляе сабой сумесь газаў. Атмасфернае паветра заўсёды змяшчае вадзяную пару, канцэнтрацыя малекул якой каля паверхні Зямлі вагаецца ад 3 % у тропіках да $2 \cdot 10^{-5}$ % у Антарктыдзе. З паверхні акіянаў, мораў і рэк, а таксама з сушы за год выпарваецца звыш $5 \cdot 10^{14}$ м^3 вады, што прыблізна роўна аб’ёму вады ў Чорным моры. На выпарэнне затрачваецца каля паловы ўсёй паглынутай паверхняй Зямлі энергіі сонечнага выпраменьвання. Пры кандэнсацыі пары колькасць цеплаты, якая раней спатрэбілася для выпарэння вадкасці,

выдзяляецца ў атмасферу. Гэта вядзе да награвання атмасферы і папярэджвае рэзкія ваганні тэмпературы. Пры перамяшчэнні вадзяной пары ў атмасферы на вялікія адлегласці адбываецца яе кандэнсацыя ў абласцях з больш нізкай тэмпературай. Такім чынам, у адных абласцях паверхні і атмасферы Зямлі пераважаюць працэсы выпарэння вады, а ў другіх — працэсы кандэнсацыі вадзяной пары.

Насычаная пара. Пару, якая знаходзіцца ў стане дынамічнай раўнавагі з вадкасцю, называюць *насычанай*. Насычаная пара валодае ўласцівасцямі, якія адрозніваюцца ад уласцівасцей ідэальнага газу. Па-першае, ціск насычанай пары пры пастаяннай тэмпературы не залежыць ад яе аб'ёму. Колькасць малекул, якія пераходзяць з вадкасці ў пару праз адзінку плошчы яе паверхні за адзінкавы прамежак часу, залежыць толькі ад тэмпературы і з'яўляецца пастаяннай велічынёй. Колькасць малекул, што пераходзіць з пары ў вадкасць, залежыць ад канцэнтрацыі пары, а значыць, ад яе ціску. Таму пры памяншэнні аб'ёму пары яе ціск адразу павялічваецца, што вядзе да ўзрастання колькасці малекул, якія пераходзяць у вадкасць. У выніку колькасць малекул пары змяншаецца і праз некаторы прамежак часу ўсталёўваецца ранейшы ціск. Пры павелічэнні аб'ёму пары яе ціск, наадварот, памяншаецца. Разам з гэтым памяншаецца і колькасць малекул, якія пераходзяць з пары ў вадкасць. У выніку колькасць малекул, якія пакідаюць паверхню вадкасці (яна не змяняецца пры $T = \text{const}$), перавышае колькасць малекул, што вяртаюцца ў вадкасць. Раўнавага зноў аднаўляецца пры дасягненні першапачатковага значэння ціску.

Другая вызначальная ўласцівасць насычанай пары звязана з залежнасцю яе ціску ад тэмпературы. Ціск $p_н$ насычанай пары ўзрастае значна хутчэй, чым ціск ідэальнага газу $p_{і.г}$ пры павелічэнні тэмпературы. У выпадку ідэальнага газу рост ціску абумоўлены толькі павелічэннем яго тэмпературы ($p = nkT$, $V = \text{const}$). У выпадку ж насычанай пары рост тэмпературы вядзе да павелічэння колькасці малекул, што пераходзяць з вадкасці ў пару, г. зн. да росту канцэнтрацыі малекул пары. У адпаведнасці з формулай $p = nkT$ ціск пары павялічваецца не толькі з прычыны непасрэднага павышэння тэмпературы, але і ў выніку павелічэння канцэнтрацыі малекул пары, выкліканага таксама павышэннем тэмпературы.

Пры пераходзе з аднаго стану ў другі маса насычанай пары змяняецца. Таму законы ідэальнага газу для ізапрацэсаў можна прымяняць да пары толькі ў тым выпадку, калі яна далёкая ад насычэння і яе маса застаецца нязменнай. Аднак ураўненне Клапейрона—Мендзялеева $pV = \frac{m}{M}RT$ можна выкарыстоўваць для таго, каб знайсці любы з параметраў (p, V, T, m, ρ) насычанай пары.

Ціск (шчыльнасць) насычанай пары пры дадзенай тэмпературы — максімальны ціск (шчыльнасць), які можа мець пара, што знаходзіцца ў стане дынамічнай раўнавагі з вадкасцю пры гэтай тэмпературы. Пару, ціск (шчыльнасць) якой меншая за ціск (шчыльнасць) насычанай пары пры той жа тэмпературы, называюць *ненасычанай парай*.

Вільготнасць паветра. Паветра, якое змяшчае вадзяную пару, называюць *вільготным паветрам*. Асноўнымі колькаснымі характарыстыкамі такога паветра з'яўляюцца яго абсалютная і адносная вільготнасці.

Абсалютнай вільготнасцю $\rho_п$ паветра называюць фізічную велічыню, роўную шчыльнасці вадзяной пары, якая знаходзіцца ў паветры пры дадзеных умовах. Звычайна абсалютную вільготнасць выражаюць у грамах на кубічны метр $\left(\frac{г}{м^3}\right)$. Выкарыстаўшы ўраўненне Клапейрона—Мендзялеева, шчыльнасць пары можна вызначыць праз яе парцыяльны ціск $p_п$:

$$\rho_п = \frac{p_п M}{RT}, \qquad (8.1)$$

дзе $M = 18\ \frac{г}{моль}$ — малярная маса вады, T — тэмпература паветра.

Ведаючы толькі шчыльнасць $\rho_п$ або парцыяльны ціск $p_п$ пары, нельга меркаваць пра тое, у якім стане знаходзіцца пара ў дадзеных умовах і наколькі яна далёкая ад насычэння. Вось чаму ўводзяць другую характарыстыку вільготнасці паветра — *адносную вільготнасць* φ. Адносная вільготнасць паказвае, наколькі вадзяная пара пры дадзенай тэмпературы далёкая ад насычэння.

Адноснай вільготнасцю φ паветра называюць фізічную велічыню, роўную адносіне абсалютнай вільготнасці $\rho_п$ да шчыльнасці $\rho_н$ насычанай вадзяной пары пры дадзенай тэмпературы. Звычайна адносную вільготнасць выражаюць у працэнтах:

$$\varphi = \frac{\rho_п}{\rho_н} \cdot 100\,\%. \qquad (8.2)$$

Паколькі шчыльнасць пары і яе парцыяльны ціск звязаны суадносінай (8.1), то адносную вільготнасць можна вызначыць як адносіну парцыяльнага ціску $p_п$ вадзяной пары, якая знаходзіцца ў паветры пры дадзенай тэмпературы, да ціску $p_н$ насычанай пары пры той жа тэмпературы:

$$\varphi = \frac{p_п}{p_н} \cdot 100\,\%. \qquad (8.3)$$

Такім чынам, адносная вільготнасць вызначаецца не толькі абсалютнай вільготнасцю, але і тэмпературай паветра. Значэнні ціску $p_н$ і шчыльнасці $\rho_н$ насычанай вадзяной пары пры розных тэмпературах прыведзены ў табліцы 1.

Табліца 1 — Ціск і шчыльнасць насычанай вадзяной пары

t, °C	$p_н$, кПа	$\rho_н$, $\frac{г}{м^3}$	t, °C	$p_н$, кПа	$\rho_н$, $\frac{г}{м^3}$
−20	0,103	0,85	6	0,934	7,3
−18	0,125	1,05	8	1,06	8,3
−16	0,151	1,27	10	1,228	9,4
−14	0,181	1,51	12	1,402	10,7
−12	0,217	1,80	14	1,598	12,1
−10	0,260	2,14	16	1,817	13,6
−8	0,337	2,54	18	2,063	15,4
−6	0,368	2,99	20	2,338	17,3
−4	0,437	3,51	22	2,643	19,4
−2	0,517	4,13	24	2,984	21,8
0	0,611	4,84	26	3,361	24,4
2	0,705	5,60	28	3,780	27,2
4	0,813	6,40	30	4,242	30,3

Калі парцыяльны ціск вадзяной пары ў паветры роўны ціску насычанай пары пры той жа тэмпературы, гавораць, што паветра насычана вадзяной парай. Калі ж шчыльнасць вадзяной пары перавышае шчыльнасць насычанай пары, то пару ў паветры лічаць *перанасычанай*. Такі стан з'яўляецца няўстойлівым і заканчваецца кандэнсацыяй.

Тэмпературу, пры якой вадзяная пара ў выніку ізабарнага ахаладжэння робіцца насычанай, называюць *пунктам расы*. Пры паніжэнні тэмпературы ніжэй за пункт расы адбываецца кандэнсацыя вадзяной пары. Напрыклад, днём тэмпература паветра была $t_1 = 26$ °C, а шчыльнасць вадзяной пары $\rho_п = 24{,}4\ \frac{г}{м^3}$. Ноччу тэмпература панізілася да $t_2 = 16$ °C. Пры гэтай тэмпературы шчыльнасць насычанай вадзяной пары $\rho_н = 13{,}6\ \frac{г}{м^3}$. Значыць, лішак

пары скандэнсуецца і выпадзе ў выглядзе расы. Гэты працэс з'яўляецца прычынай узнікнення туману, воблакаў і дажджу. У тэхніцы кандэнсацыя звычайна адбываецца на паверхнях, якія ахалоджваюцца.

Калі адносная вільготнасць менш за 100 %, то тэмпература, якая адпавядае пункту расы, заўсёды ніжэй за тэмпературу паветра, і тым ніжэй, чым меншая адносная вільготнасць.

Прыборы для вымярэння вільготнасці. Адносную вільготнасць паветра звычайна вымяраюць псіхрометрам (рыс. 48). Псіхрометр складаецца з двух тэрмометраў — сухога і вільготнага. Сухі тэрмометр паказвае тэмпературу паветра. Рэзервуар вільготнага тэрмометра абгорнуты палоскай тканіны, край якой апушчаны ў ваду. Вада з тканіны выпарваецца, у выніку чаго тэрмометр ахалоджваецца. Чым меншая адносная вільготнасць паветра, тым больш інтэнсіўна адбываецца працэс выпарэння вады з тканіны і тым мацней ахалоджваецца вільготны тэрмометр. І наадварот — пры вялікай адноснай вільготнасці вільготны тэрмометр ахалоджваецца нязначна. Калі адносная вільготнасці $\varphi = 100$ %, вада і яе пара знаходзяцца ў дынамічнай раўнавазе, і паказанні абодвух тэрмометраў супадаюць. Ведаючы паказанні сухога і вільготнага тэрмометраў, адносную вільготнасць паветра вызначаюць з выкарыстаннем спецыяльнай табліцы, якая называецца псіхраметрычнай (табліца 2).

Рыс. 48

Жывыя арганізмы і расліны вельмі адчувальныя да адноснай вільготнасці паветра. Пры тэмпературы 20—25 °С найбольш спрыяльная для чалавека адносная вільготнасць складае 40—60%. Пры высокай вільготнасці, асабліва ў спякотны дзень, выпарэнне вільгаці з паверхні скуры ажыццяўляецца з цяжкасцю, што вядзе да парушэння надзвычай важных біялагічных механізмаў рэгулявання тэмпературы цела. Пры нізкай вільготнасці адбываецца інтэнсіўнае выпарэнне з паверхні цела і высыханне слізістай абалонкі носа, гартані, лёгкіх, што пагаршае самаадчуванне. Пры нізкай вільготнасці ў паветры даўжэй захоўваюцца патагенныя мікраарганізмы, што таксама небяспечна для чалавека. У выпадку нізкай вільготнасці паветра інтэнсіўнасць выпарэння з лістоў раслін павялічваецца, і пры нязначным запасе вільгаці ў глебе яны хутка вянуць і засыхаюць. Вільготнасць паветра трэба ўлічваць і ў розных тэхналагічных працэсах, такіх, напрыклад, як сушка і захоўванне гатовых вырабаў. Стальныя вырабы пры высокай вільготнасці хутка ржавеюць. Захоўванне твораў мастацтва і кніг таксама патрабуе падтрымання аптымальнай вільготнасці паветра.

Вялікае значэнне мае вільготнасць ў метэаралогіі для прадказання надвор'я. Калі паветра каля паверхні Зямлі ахалоджваецца да тэмпературы ніжэй за пункт расы, то могуць утварацца туман, воблакі, раса або іней.

Табліца 2 — Псіхраметрычная табліца

Паказанне сухога тэрмометра, °С	Рознасць паказанняў сухога і вільготнага тэрмометраў, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Адносная вільготнасць, %										
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

1. Ціск насычанай пары пры пастаяннай тэмпературы не залежыць ад яе аб'ёму.

2. Ціск насычанай пары залежыць ад тэмпературы пары і канцэнтрацыі яе малекул:

$$p = nkT.$$

3. Абсалютнай вільготнасцю паветра называюць фізічную велічыню, роўную шчыльнасці вадзяной пары, якая знаходзіцца ў паветры пры дадзеных умовах.

4. Адноснай вільготнасцю паветра называюць фізічную велічыню, роўную адносіне абсалютнай вільготнасці да шчыльнасці насычанай вадзяной пары пры дадзенай тэмпературы:

$$\varphi = \frac{\rho_{п}}{\rho_{н}} \cdot 100~\%.$$

?

1. Якая пара называецца насычанай? Якія фізічныя працэсы абумоўліваюць стан дынамічнай раўнавагі паміж вадкасцю і яе парай?

2. Якія ўласцівасці насычанай пары адрозніваюць яе ад ідэальнага газу?

3. Што называюць абсалютнай і адноснай вільготнасцю паветра? У якіх адзінках іх вымяраюць?

4. Што называюць пунктам расы?

5. Як можна знайсці адносную вільготнасць паветра, калі вядомы яго тэмпература і пункт расы?

6. Як змяняюцца абсалютная і адносная вільготнасць паветра пры яго награванні?

7. На якіх фізічных з'явах заснавана дзеянне псіхрометра?

8. Ці можна, выкарыстаўшы псіхрометр, вызначыць адносную вільготнасць паветра, тэмпература якога ніжэй за 0 °С?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Вечарам пры тэмпературы $t_1 = 20$ °С адносная вільготнасць паветра $\varphi_1 = 60~\%$. Ці выпадзе раса, калі ноччу тэмпература панізіцца да $t_2 = 12$ °С?

Дадзена:
$t_1 = 20$ °С
$t_2 = 12$ °С
$\varphi_1 = 60~\%$

Ці выпадзе раса?

Рашэнне. Для таго каб даведацца, ці выпадзе раса пры паніжэнні тэмпературы паветра да $t_2 = 12$ °С, неабходна параўнаць шчыльнасць (ціск) насычанай пары пры гэтай тэмпературы са шчыльнасцю (парцыяльным ціскам) пары пры тэмпературы $t_1 = 20$ °С. Пры тэмпературы $t_2 = 12$ °С шчыльнасць насычанай вадзяной пары $\rho_{н2} = 10{,}7~\frac{г}{м^3}$ (гл. табліцу 1 § 8). Шчыльнасць вадзяной пары, якая змяшчаецца ў паветры пры тэмпературы $t_1 = 20$ °С, можна знайсці з формулы $\varphi_1 = \frac{\rho_1}{\rho_{н1}} \cdot 100~\%$, дзе $\rho_{н1} = 17{,}3~\frac{г}{м^3}$ (гл. табліцу 1 § 8):

$$\rho_1 = \frac{\varphi_1 \rho_{н1}}{100~\%} = \frac{60~\% \cdot 17{,}3~\frac{г}{м^3}}{100~\%} = 10{,}4~\frac{г}{м^3}.$$

Паколькі $\rho_1 < \rho_{н2} \left(10{,}4\ \frac{г}{м^3} < 10{,}7\ \frac{г}{м^3}\right)$, то наяўнай у паветры колькасці вадзяной пары недастаткова для насычэння, раса не выпадзе.

Адказ: раса не выпадзе.

Прыклад 2. У памяшканні ўмяшчальнасцю $V = 1{,}0 \cdot 10^3$ м^3 пры тэмпературы $t_1 = 10$ °С адносная вільготнасць паветра $\varphi_1 = 40$ %. Вызначце масу вады, якую трэба выпарыць, каб пры тэмпературы $t_2 = 18$ °С адносная вільготнасць паветра ў памяшканні павысілася да $\varphi_2 = 60$ %.

Дадзена:
$V = 1{,}0 \cdot 10^3$ м^3
$t_1 = 10$ °С
$\varphi_1 = 0{,}40$
$t_2 = 18$ °С
$\varphi_2 = 0{,}60$

Δm — ?

Рашэнне. Пры тэмпературы $t_1 = 10$ °С у паветры памяшкання змяшчаецца вадзяная пара масай $m_1 = \varphi_1 \rho_{н1} V$, дзе $\rho_{н1} = 9{,}4\ \frac{г}{м^3}$ (гл. табліцу 1 § 8). Маса вадзяной пары ў дадзеным аб'ёме паветра пры тэмпературы t_2: $m_2 = \varphi_2 \rho_{н2} V$, дзе $\rho_{н2} = 15{,}4\ \frac{г}{м^3}$ (гл. табліцу 1 § 8). Тады $\Delta m = m_2 - m_1$ або

$$\Delta m = \varphi_2 \rho_{н2} V - \varphi_1 \rho_{н1} V = (\varphi_2 \rho_{н2} - \varphi_1 \rho_{н1}) V.$$

$$\Delta m = \left(0{,}60 \cdot 15{,}4\ \frac{г}{м^3} - 0{,}40 \cdot 9{,}4\ \frac{г}{м^3}\right) \cdot 1{,}0 \cdot 10^3\ м^3 = 5{,}5\ кг.$$

Адказ: $\Delta m = 5{,}5$ кг.

Практыкаванне 6

1. Пры тэмпературы $t = 16$ °С парцыяльны ціск вадзяной пары ў паветры $p_п = 1{,}2$ кПа. Вызначце адносную вільготнасць паветра.

2. Вызначце адносную вільготнасць паветра ў памяшканні ўмяшчальнасцю $V = 200$ м^3 пры тэмпературы $t = 20$ °С, калі маса вадзяной пары ў памяшканні $m = 2{,}4$ кг.

3. Пры тэмпературы $t = 18$ °С адносная вільготнасць паветра $\varphi = 61$ %. Пры якой тэмпературы пачне выпадаць раса?

4. Пры тэмпературы $t = 28$ °С адносная вільготнасць паветра $\varphi = 50$ %. Вызначце масу расы, якая выпала з паветра аб'ёмам $V = 1{,}0$ км^3, пры паніжэнні тэмпературы на $\Delta T = 16$ К.

5. Вызначце адносную і абсалютную вільготнасці паветра, калі паказанне сухога тэрмометра псіхрометра $t_с = 14$ °С, а паказанне вільготнага — $t_в = 10$ °С.

6. Пры тэмпературы $t = 20$ °C адносная вільготнасць паветра $\varphi = 44$ %. Вызначце паказанне вільготнага тэрмометра псіхрометра.

7. Паветра аб’ёмам $V_1 = 2{,}0$ м^3, адносная вільготнасць якога $\varphi_1 = 20$ %, змяшалі з паветрам той жа тэмпературы, аб’ём і адносная вільготнасць якога адпаведна $V_2 = 3{,}0$ м^3 і $\varphi_2 = 30$ %. Вызначце адносную вільготнасць сумесі, калі яе аб’ём $V_3 = 5{,}0$ м^3.

8*. У пасудзіне знаходзіцца паветра пры тэмпературы $t_1 = 10$ °C, адносная вільготнасць якога $\varphi_1 = 60$ %. Вызначце адносную вільготнасць паветра пасля змяншэння яго аб’ёму ў тры разы і награвання да тэмпературы $t_2 = 100$ °C, пры якой ціск насычанай пары $p_{н2} = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па.

Глава 2

АСНОВЫ ТЭРМАДЫНАМІКІ

§ 9. Тэрмадынамічная сістэма. Тэрмадынамічная раўнавага. Унутраная энергія. Унутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу

У 9 класе вы даведаліся, што поўная энергія фізічнай сістэмы ўяўляе сабой суму яе механічнай энергіі і ўнутраных энергій цел, якія ўтвараюць сістэму. Прычым змяненне механічнай энергіі ў шэрагу выпадкаў адбываецца ў выніку пераходу яе часткі ва ўнутраную энергію цел сістэмы. Рэжучыя інструменты прыкметна награваюцца пры заточцы іх на тачыльным камені. Пры бегу канькабежца па лёдзе пад панькамі растае́ лёд, што забяспечвае добрае слізганне. У гэтых прыкладах целы пры трэнні награваюцца, і інтэнсіўнасць хаатычнага руху іх малекул узрастае, што вядзе да павелічэння ўнутранай энергіі цел. Як жа вызначыць унутраную энергію тэрмадынамічнай сістэмы? І што разумеюць пад тэрмадынамічнай сістэмай?

Тэрмадынамічная сістэма. Тэрмадынамічная раўнавага. Вывады тэрмадынамікі грунтуюцца па фундаментальных законах, якія называюць пачаткамі тэрмадынамікі. Гэтыя законы ўстаноўлены ў выніку абагульнення шматлікіх эксперыментальных фактаў. Абапіраючыся на іх, тэрмадынаміка дазваляе рабіць пэўныя вывады аб уласцівасцях даследуемых сістэм, якія пацвярджаюцца эксперыментальна. Фізічныя целы і іх мадэлі ў тэрмадынаміцы называюць *тэрмадынамічнымі сістэмамі*. Тэрмадынамічную сістэму характарызуюць наборам параметраў, якія вызначаюць яе стан. У адрозненне ад малекулярна-кінетычнай тэорыі ў тэрмадынаміцы не разглядаюць мікраскапічную будову цел і для іх апісання выкарыстоўваюць не фізічныя характарыстыкі малекул (мікрапараметры), а параметры сістэмы (макрапараметры), такія як ціск, аб'ём, тэмпература.

Замкнутая, або ізаляваная, тэрмадынамічная сістэма імкнецца да раўнавагі, калі ўсе яе макрапараметры не змяняюцца з цягам часу. Інакш кажучы, *для кожнай ізаляванай тэрмадынамічнай сістэмы існуе стан тэрмадынамічнай раўнавагі, у які яна пераходзіць самаадвольна.*

Гэтае сцверджанне называюць нулявым пачаткам тэрмадынамікі.

Унутраная энергія. Гаворачы аб поўнай энергіі макраскапічнага цела, неабходна заўсёды ўлічваць не толькі яго механічную энергію (кінетычную і патэнцыяльную), але таксама кінетычную энергію цеплавога руху яго часціц і патэнцыяльную энергію іх узаемадзеяння. У тэрмадынаміцы пад унутранай энергіяй цела разумеюць поўную энергію ўсіх часціц, якія ўтвараюць цела. Гэта кінетычная энергія цеплавога руху малекул, кінетычная энергія руху атамаў унутры малекул, патэнцыяльная энергія ўзаемадзеяння паміж малекуламі, энергія электронных абалонак атамаў і ўнутрыядзерная энергія.

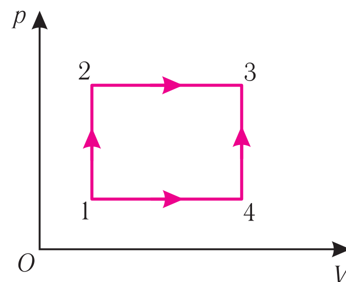
Унутраная энергія любой тэрмадынамічнай сістэмы складаецца з унутраных энергій цел, што ўваходзяць у дадзеную сістэму.

У тэрмадынаміцы галоўную ролю адыгрывае не сама ўнутраная энергія, а яе змяненне, якое адбываецца пры пераходзе сістэмы з аднаго стану ў другі. Пад прырашчэннем унутранай энергіі разумеюць рознасць унутраных энергій у канчатковым і пачатковым станах:

$$\Delta U = U_2 - U_1.$$

Напрыклад, пераход некаторай масы ідэальнага газу са стану *1* у стан *3* (рыс. 49) можна ажыццявіць або ў ходзе працэсу *1* → *2* → *3* (пры ізахорным награванні, а затым пры ізабарным расшырэнні), або ў ходзе працэсу *1* → *4* → *3* (пры ізабарным расшырэнні, а затым пры ізахорным награванні). Аднак прырашчэнне ўнутранай энергіі газу і ў адным і ў другім выпадку будзе аднолькавым:

$$\Delta U_{123} = \Delta U_{143} = U_3 - U_1.$$



Рыс. 49

Унутраная энергія з'яўляецца функцыяй стану сістэмы. Гэта азначае, што **змяненне ўнутранай энергіі пры пераходзе тэрмадынамічнай сістэмы з аднаго стану ў другі залежыць толькі ад значэнняў параметраў гэтых станаў, а не ад працэсу пераходу.**

Унутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу. Вызначым унутраную энергію ідэальнага аднаатамнага газу, г. зн. газу, які складаецца з асобных атамаў. Напрыклад, аднаатамнымі з'яўляюцца інертныя газы — гелій, неон, аргон і інш.

З азначэння паняцця «ідэальны газ» вынікае, што яго ўнутраная энергія з'яўляецца сумай кінетычных энергій хаатычнага руху ўсіх малекул або атамаў (узаемадзеянне паміж часціцамі адсутнічае). Значыць, унутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу роўная здабытку сярэдняй кінетычнай энергіі $\langle E_к \rangle$ цеплавога руху часціц на іх колькасць N, г. зн. $U = N\langle E_к \rangle$. Паколькі $N = \frac{m}{M}N_A$, дзе m — маса газу, а $\langle E_к \rangle = \frac{3}{2}kT$, то

$$U = \frac{m}{M}N_A \frac{3}{2}kT.$$

Калі ўлічыць, што $kN_A = R$, атрымаем:

$$\boldsymbol{U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT,} \qquad (9.1)$$

або

$$U = \frac{3}{2}\nu RT.$$

Як бачна з формулы (9.1), **унутраная энергія дадзенай масы ідэальнага аднаатамнага газу прапарцыянальная абсалютнай тэмпературы газу**. Яна не залежыць ад іншых макраскапічных параметраў стану — ціску і аб'ёму. Значыць, змяненне ўнутранай энергіі дадзенай масы ідэальнага аднаатамнага газу адбываецца толькі пры змяненні яго тэмпературы:

$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T. \qquad (9.2)$$

Пры вызначэнні ўнутранай энергіі рэальных газаў, вадкасцей і цвёрдых цел неабходна ўлічваць патэнцыяльную энергію ўзаемадзеяння часціц, якая залежыць ад адлегласці паміж імі. Таму ў агульным выпадку ўнутраная энергія макраскапічных цел залежыць не толькі ад абсалютнай тэмпературы, але і ад аб'ёму.

Пры вывучэнні фізікі ў 8 класе вы даведаліся, што змяніць стан тэрмадынамічнай сістэмы можна двума спосабамі: выкарыстаўшы цеплаперадачу і выконваючы работу. Працэс цеплаперадачы і выкананне работы характарызуюць адпаведнымі фізічнымі велічынямі — колькасцю цеплаты Q і работай A, якія з'яўляюцца мерамі змянення ўнутранай энергіі сістэмы.

1. Фізічныя целы і іх мадэлі ў тэрмадынаміцы называюць тэрмадынамічнымі сістэмамі. Тэрмадынамічную сістэму характарызуюць наборам макрапараметраў, якія вызначаюць яе стан.

2. Стан ізаляванай тэрмадынамічнай сістэмы, калі ўсе яе макрапараметры не змяняюцца з цягам часу, называюць раўнаважным.

3. Пад унутранай энергіяй тэрмадынамічнай сістэмы разумеюць суму кінетычнай энергіі ўсіх часціц сістэмы і патэнцыяльнай энергіі іх узаемадзеяння.

4. Змяненне ўнутранай энергіі цела пры пераходзе з аднаго стану ў другі залежыць толькі ад значэнняў параметраў гэтых станаў, а не ад працэсу пераходу.

5. Унутраная энергія дадзенай масы ідэальнага аднаатамнага газу залежыць толькі ад тэмпературы:

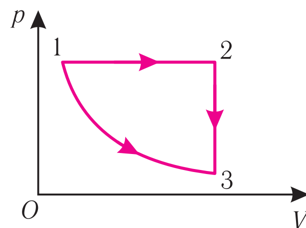
$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT.$$

1. Што называюць тэрмадынамічнай сістэмай?

2. Што разумеюць пад тэрмадынамічнай раўнавагай?

3. Ад якіх параметраў залежыць унутраная энергія ідэальнага газу і ўнутраная энергія рэальных газаў?

4. Ідэальны газ пэўнай масы пераводзяць са стану *1* у стан *3* двума рознымі спосабамі: ізатэрмічна ($1 \to 3$) і ажыццяўляючы спачатку ізабарнае расшырэнне, а затым ізахорнае ахалоджванне ($1 \to 2 \to 3$) (рыс. 50). Ці залежыць змяненне ўнутранай энергіі газу ад спосабу яго пераводу са стану *1* у стан *3*?



Рыс. 50

5. Якімі спосабамі можна змяніць унутраную энергію сістэмы?

6. Якая фізічная велічыня з'яўляецца мерай змянення ўнутранай энергіі сістэмы пры цеплаперадачы?

7. Як суадносяцца ўнутраныя энергіі газаў, неону і гелію, узятых пры аднолькавай тэмпературы ў колькасці 1 моль?

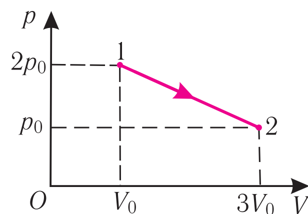
Прыклад рашэння задачы

На рысунку 51 у каардынатах (p, V) адлюстраваны працэс пераходу ідэальнага аднаатамнага газу пэўнай масы са стану *1* у стан *2*. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі газу, калі ціск газу ў канчатковым стане $p_0 = 1{,}5$ МПа, а яго аб'ём у пачатковым стане $V_0 = 2{,}0$ л.

Дадзена:
$p_0 = 1{,}5$ МПа $= 1{,}5 \cdot 10^6$ Па
$V_0 = 2{,}0$ л $= 2{,}0 \cdot 10^{-3}$ м^3

ΔU — ?

Рашэнне. Прырашчэнне ўнутранай энергіі ідэальнага аднаатамнага газу $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T$. Знайсці масу m газу, яго малярную масу M і змяненне тэмпературы ΔT няма магчымасці. Аднак, выкарыстаўшы ўраўненне Клапейрона—Мендзялеева, для станаў *1* і *2* можна вызначыць значэнне выразу $\frac{m}{M}R\Delta T$. З рысунка 51 бачна, што ў стане *1* ціск газу $2p_0$, а яго аб'ём V_0, а ў стане *2* — p_0 і $3V_0$. Тады ўраўненне Клапейрона—Мендзялеева для станаў *1* і *2* будзе выглядаць так:



Рыс. 51

$$2p_0V_0 = \frac{m}{M}RT_1, \qquad (1)$$

$$p_0 3V_0 = \frac{m}{M}RT_2. \qquad (2)$$

Вылічым з ураўнення (2) ураўненне (1): $3p_0V_0 - 2p_0V_0 = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1)$ і атрымаем, што $p_0V_0 = \frac{m}{M}R\Delta T$. Тады $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T = \frac{3}{2}p_0V_0$.

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 1{,}5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 4{,}5 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 4{,}5 \text{ кДж}.$$

Адказ: $\Delta U = 4{,}5$ кДж.

Практыкаванне 7

1. Вызначце ўнутраную энергію аргону масай $m = 4{,}0$ г пры тэмпературы $t = 27$ °C.

2. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі ідэальнага аднаатамнага газу, колькасць рэчыва якога $\nu = 2{,}0$ моль, пры яго награванні на $\Delta t = 20$ °C.

3. Ідэальны аднаатамны газ займае аб'ём $V = 4{,}0$ л, яго ціск $p = 0{,}30$ МПа. Вызначце ўнутраную энергію газу.

4. Пры змяненні стану ідэальнага аднаатамнага газу яго аб'ём павялічыўся ў $\alpha = 2{,}4$ раза, а ціск паменшыўся ў $\beta = 1{,}2$ раза. Вызначце адносіну ўнутраных энергій газу ў канчатковым і пачатковым станах.

5. Маса гелію $m = 2{,}0$ кг, яго ціск $p = 60$ кПа. Вызначце ўнутраную энергію гелію, калі яго шчыльнасць $\rho = 0{,}20\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

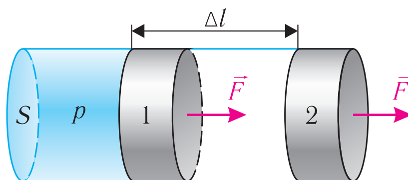
6. Пры тэмпературы $t = 27$ °C унутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу $U = 1{,}2$ Дж. Вызначце колькасць атамаў газу.

7*. Ідэальны аднаатамны газ пераходзіць з аднаго стану ў другі так, што яго ціск змяняецца па законе $p = AT^2$, дзе A — каэфіцыент прапарцыянальнасці. Пры павелічэнні аб'ёму газу ў тры разы прырашчэнне яго ўнутранай энергіі $\Delta U = U_2 - U_1 = -0{,}60$ кДж. Вызначце першапачатковы ціск газу, калі яго аб'ём у пачатковым стане $V_1 = 4{,}0$ л.

§ 10. Работа ў тэрмадынаміцы. Колькасць цеплаты

У 9 класе вы даведаліся, што работа сілы (механічная работа) звязана з ператварэннем аднаго віду энергіі ў другі, напрыклад, механічнай энергіі ва ўнутраную. Работу сілы разглядаюць як меру змянення энергіі фізічнай сістэмы. А як вызначыць работу ў тэрмадынаміцы? Як можна выразіць гэту работу праз макраскапічныя параметры — ціск і аб'ём?

Разгледзім газ, які знаходзіцца ў цыліндрычнай пасудзіне з плошчай асновы S, закрытай рухомым поршнем (рыс. 52). Узаемадзеянне газу з поршнем, а таксама са сценкамі пасудзіны можна характарызаваць ціскам p, які газ аказвае на іх. Дапусцім, што ў выніку ізабарнага расшырэння газу поршань перамясціўся са становішча *1* у становішча *2* на адлегласць Δl. Модуль сілы ціску газу, што дзейнічае на поршань, $F = pS$. Гэта сіла выконвае работу па перамяшчэнні поршня



Рыс. 52

$$A_{12} = F\Delta l \cos\alpha, \qquad (10.1)$$

дзе α — вугал паміж напрамкамі сілы і перамяшчэння. У разгледжаным прыкладзе $\alpha = 0$, тады

$$A_{12} = pS\Delta l.$$

Здабытак $S\Delta l$ вызначае прырашчэнне аб'ёму $\Delta V = V_2 - V_1$ (гл. рыс. 52), таму работа газу пры яго ізабарным расшырэнні

$$A_{12} = p\Delta V = p(V_2 - V_1), \qquad (10.2)$$

дзе V_1 — пачатковы аб'ём газу, V_2 — аб'ём газу ў канчатковым стане.

Паколькі ціск газу p заўсёды велічыня дадатная, з формулы (10.2) вынікае, што, калі газ расшыраецца ($V_2 > V_1$), работа, якую выконвае сіла

ціску газу, дадатная ($A_{12} > 0$), а ў выпадку сціскання ($V_2 < V_1$) работа адмоўная ($A_{12} < 0$).

Працэс павольнага ізабарнага сціскання газу са стану *2* з пачатковым аб'ёмам V_2 у стан *1* з канчатковым аб'ёмам V_1 можна характарызаваць работай A'_{21} знешніх сіл над газам:

$$A'_{21} = p(V_2 - V_1). \qquad (10.3)$$

З параўнання роўнасцей (10.2) і (10.3) вынікае суадносіна паміж работай A'_{21}, выкананай знешнімі сіламі, і работай A_{12}, якую выконвае сіла ціску газу: $A'_{21} = A_{12}$. Гэта суадносіна адпавядае трэцяму закону Ньютана (знешняя сіла $\vec{F}$, якая дзейнічае на газ з боку поршня, мае напрамак, супрацьлеглы сіле ціску $\vec{F}$, якая дзейнічае на поршань з боку газу). З формулы (10.3) бачна, што работа, выкананая знешнімі сіламі, дадатная ($A' > 0$), калі адбываецца сцісканне газу ($V_{пач} > V_{кан}$). Калі газ расшыраецца ($V_{пач} < V_{кан}$), то работа, выкананая знешнімі сіламі, адмоўная ($A' < 0$).

Геаметрычнае тлумачэнне работы. Пабудуем графік залежнасці ціску газу ад яго аб'ёму пры $p = \text{const}$. Як бачна з рысунка 53, пры ізабарным расшырэнні газу работа, выкананая сілай ціску газу, лікава роўная плошчы прамавугольніка V_1ABV_2.

Рыс. 53

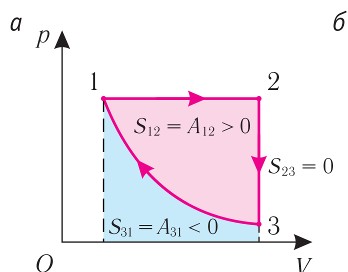
Калі працэс пераходу газу з пачатковага стану ў канчатковы не з'яўляецца ізабарным, то работа, выкананая сілай ціску газу пры змяненні яго аб'ёму ад V_1 да V_2, лікава роўная плошчы фігуры, абмежаванай графікам працэсу (крывая *1—2*), воссю OV і прамымі, якія адпавядаюць значэнням аб'ёмаў V_1 і V_2 (рыс. 54).

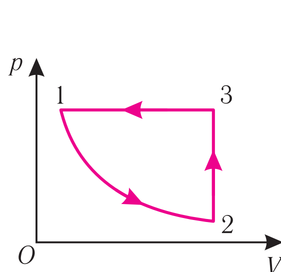
Рыс. 54

Працэс, у выніку якога тэрмадынамічная сістэма, прайшоўшы некаторую паслядоўнасць станаў, зноў вяртаецца ў зыходны стан, называюць *цыклічным працэсам* або *цыклам* (рыс. 55). Работа, выкананая сістэмай пры цыклічным працэсе, ці работа цыкла, роўная плошчы фігуры, абмежаванай лініямі, якія адлюстроўваюць цыкл:

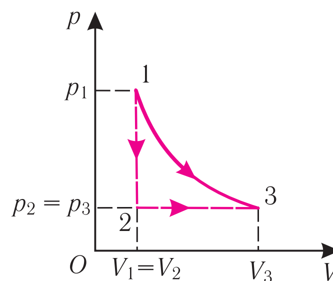
$$A = A_{12} + A_{23} + A_{31} = S_{12} + S_{23} + S_{31} = S_{12} + S_{31} = S_{1231},$$

дзе $S_{23} = 0$, $S_{1231} > 0$ на рысунку 55, *а* і $S_{1231} < 0$ на рысунку 55, *б*.





Рыс. 55



Рыс. 56

Калі «крывая расшырэння» (ізабара *1* → *2*) (гл. рыс. 55, *а*) размешчана вышэй, чым «крывая сціскання» (ізатэрма *3* → *1*), то поўная работа, выкананая сістэмай за цыкл (работа цыкла), дадатная. Калі ж, як паказана на рысунку 55, *б*, «крывая сціскання» (ізабара *3* → *1*) размешчана вышэй, чым «крывая расшырэння» (ізатэрма *1* → *2*), то работа цыкла адмоўная.

З рысунка 56 бачна, што лікавае значэнне работы цыкла вызначаецца не толькі пачатковым і канчатковым станамі сістэмы, але і відам працэсу. Напрыклад, газ са стану *1* можна перавесці ў стан *3* або ў выніку ізатэрмічнага расшырэння, або спачатку ізахорна панізіўшы яго ціск да значэння p_2, а затым ізабарна павялічыўшы яго аб'ём ад значэння V_1 да значэння V_3.

Як бачна з рысунка 56, у першым выпадку работа, выкананая сіламі ціску газу, большая, чым у другім. Такім чынам, **работа выкананая пры пераходзе тэрмадынамічнай сістэмы з аднаго стану ў другі, залежыць не толькі ад пачатковага і канчатковага станаў сістэмы, але і ад віду працэсу**.

Колькасць цеплаты і ўдзельная цеплаёмістасць. Такім чынам, існуюць два спосабы перадачы энергіі ад аднаго цела да другога. Першы характарызуецца перадачай энергіі ў працэсе механічнага ўзаемадзеяння цел — механічная энергія аднаго цела пераходзіць у энергію хаатычнага руху часціц рэчыва другога цела або, наадварот, змяншэнне энергіі хаатычнага руху часціц рэчыва аднаго цела адбіваецца на павелічэнні механічнай энергіі другога цела. Такую форму перадачы энергіі ў тэрмадынаміцы (як і ў механіцы) называюць работай. Напрыклад, у разгледжанай намі раней тэрмадынамічнай сістэме (газ у цыліндрычнай пасудзіне пад поршнем) расшырэнне газу выклікае перамяшчэнне поршня. Пры гэтым змяншэнне ўнутранай энергіі газу роўнае рабоце, выкананай сілай ціску газу, пад дзеяннем якой поршань перамясціўся.

Пры ажыцяўленні другога спосабу перадачы энергіі адбываецца непасрэдны абмен энергіямі цеплавога руху паміж часціцамі цел (частак цел), якія ўваходзяць у склад тэрмадынамічнай сістэмы. За кошт перададзенай пры гэтым энергіі павялічваецца ўнутраная энергія аднаго цела і змяншаецца ўнутраная энергія другога. Калі, напрыклад, прывесці ў судакрананне два целы з рознымі тэмпературамі, то часціцы больш нагрэтага цела будуць перадаваць частку сваёй энергіі часціцам больш халоднага цела. У выніку ўнутраная энергія першага цела змяншыцца, а другога цела павялічыцца. Працэс перадачы энергіі ад аднаго цела да другога без выканання работы называюць *цеплаперадачай*. Як вы ўжо ведаеце, існуюць тры віды цеплаперадачы: цеплаправоднасць, канвекцыя і выпраменьванне.

Колькаснай мерай энергіі, перададзенай целу ў працэсе цеплаперадачы, з'яўляецца колькасць цеплаты Q. У СІ адзінкай колькасці цеплаты з'яўляецца джоўль (Дж). Часам для вымярэння колькасці цеплаты выкарыстоўваюць пазасістэмную адзінку — калорыю (1 кал = 4,19 Дж).

Калі працэс цеплаперадачы не суправаджаецца змяненнем агрэгатнага стану рэчыва, то

$$Q = cm(T_2 - T_1), \qquad (10.4)$$

дзе m — маса цела, $T_2 - T_1 = \Delta T$ — рознасць тэмператур у канцы і ў пачатку працэсу цеплаперадачы, *c* — *удзельная цеплаёмістасць рэчыва* — фізічная велічыня, лікава роўная колькасці цеплаты, якую атрымлівае або аддае рэчыва масай 1 кг пры змяненні яго тэмпературы на 1 К. Удзельную цеплаёмістасць вымяраюць у джоўлях, падзеленых на кілаграм і кельвін $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\right)$.

Фізічная велічыня, роўная здабытку масы цела на ўдзельную цеплаёмістасць рэчыва, носіць назву цеплаёмістасці цела. Абазначаюць цеплаёмістасць C і вымяраюць у джоўлях на кельвін $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{К}}\right)$: $C = cm$. Цеплаёмістасць, у адрозненне ад удзельнай цеплаёмістасці, з'яўляецца цеплавой характарыстыкай цела, а не рэчыва.

Удзельная цеплата плаўлення. Фізічную велічыню, лікава роўную колькасці цеплаты, неабходнай для ператварэння крышталічнага рэчыва масай 1 кг, узятага пры тэмпературы плаўлення, у вадкасць той жа тэмпературы, называюць *удзельнай цеплатой плаўлення* λ. Для плаўлення цела масай m, папярэдне нагрэтага да тэмпературы плаўлення, яму неабходна перадаць колькасць цеплаты $Q_{\text{пл}} = \lambda m$. Пры крышталізацыі цела выдзяляецца колькасць цеплаты $Q_{\text{кр}} = -\lambda m$.

Удзельная цеплата параўтварэння. Фізічную велічыню, лікава роўную колькасці цеплаты, якую неабходна перадаць вадкасці масай 1 кг, што знаходзіцца пры тэмпературы кіпення, для ператварэння яе пры пастаяннай тэмпературы ў пару, называюць *удзельнай цеплатой параўтварэння* L. Колькасць цеплаты, неабходную для ператварэння вадкасці масай m, папярэдне нагрэтай да тэмпературы кіпення, у пару, вызначаюць па формуле $Q_п = Lm$. Кандэнсацыя пары суправаджаецца выдзяленнем колькасці цеплаты $Q_к = -Lm$.

Удзельная цеплата згарання паліва. Фізічную велічыню, лікава роўную колькасці цеплаты, якая выдзяляецца пры поўным згаранні паліва масай 1 кг, называюць *удзельнай цеплатой згарання* паліва q. Колькасць цеплаты, што выдзяляецца пры поўным згаранні некаторай масы m паліва, вызначаюць па формуле $Q_{зг} = qm$. Яна перадаецца целам, якія ўтвараюць тэрмадынамічную сістэму, і ў адносінах да іх з'яўляецца дадатнай велічынёй.

Адзначым, што ў выніку цеплаперадачы могуць змяняцца як абедзве складаючыя ўнутранай энергіі цела, так і адна з іх. Пры награванні (ахаладжэнні) змяняюцца кінетычная энергія хаатычнага руху часціц, што складаюць цела, і патэнцыяльная энергія іх узаемадзеяння. Пры плаўленні (крышталізацыі) і кіпенні (кандэнсацыі) змяняецца толькі патэнцыяльная энергія ўзаемадзеяння часціц рэчыва.

Пры выкананні работы таксама можа змяняцца як кінетычная, так і патэнцыяльная энергія часціц рэчыва. Такім чынам, як пры цеплаперадачы, так і пры выкананні работы адбываецца змяненне кінетычнай і патэнцыяльнай энергій часціц рэчыва, што прыводзіць да змянення ўнутранай энергіі цела.

1. Работу газу пры ізабарным працэсе выражаюць праз макраскапічныя параметры тэрмадынамічнай сістэмы:

$$A = p\Delta V.$$

2. Работа газу лікава роўная плошчы фігуры, абмежаванай графікам залежнасці ціску ад аб'ёму, воссю OV і прамымі, якія адпавядаюць значэнням аб'ёмаў V_1 і V_2.

3. Работа, якая выконваецца пры пераходзе сістэмы з аднаго стану ў другі, залежыць не толькі ад пачатковага і канчатковага станаў, але і ад віду працэсу.

4. Працэс перадачы энергіі ад аднаго цела да другога без выканання работы называюць цеплаперадачай.

? **1.** Як вылічыць работу, выкананую сілай ціску газу пры яго расшырэнні (сцісканні)? Як суадносяцца паміж сабой работа сілы ціску газу і работа, якую выконваюць знешнія сілы над газам?

2. У чым заключаецца геаметрычны сэнс паняцця «работа» ў тэрмадынаміцы?

3. Чаму расшырэнне газу пры адсутнасці цеплаабмену з навакольным асяроддзем суправаджаецца яго ахалоджваннем?

4. Якая фізічная велічыня з'яўляецца мерай змянення ўнутранай энергіі пры цеплаперадачы?

5. Растлумачце, чаму пры цеплаперадачы і выкананні работы змяняецца ўнутраная энергія цела.

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Вызначце работу, якую выканае сіла ціску ідэальнага газу пэўнай масы пры ізабарным павышэнні яго тэмпературы ад $t_1 = 12$ °C да $t_2 = 87$ °C, калі ціск газу і яго пачатковы аб'ём адпаведна $p = 190$ кПа і $V_1 = 6{,}0$ дм^3.

Дадзена:
$T_1 = 285$ K
$T_2 = 360$ K
$p = 190$ кПа $= 1{,}90 \cdot 10^5$ Па
$V_1 = 6{,}0$ дм$^3 = 6{,}0 \cdot 10^{-3}$ м^3

A — ?

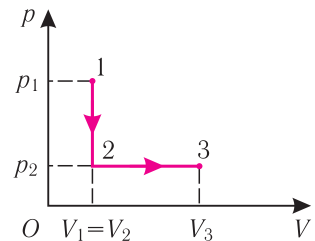
Рашэнне. Сіла ціску газу выконвае дадатную работу, паколькі пры ізабарным награванні павялічваецца яго аб'ём. Таму $A = p(V_2 - V_1) = pV_2 - pV_1$. Згодна з ураўненнем Клапейрона—Мендзялеева $pV_1 = \nu RT_1$ і $pV_2 = \nu RT_2$. Значыць,

$$A = p(V_2 - V_1) = \nu R(T_2 - T_1) = \nu RT_1\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) = pV_1\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right).$$

$$A = 1{,}90 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \left(\frac{360 \text{ K}}{285 \text{ K}} - 1\right) = 3{,}0 \cdot 10^2 \text{ Дж} = 0{,}30 \text{ кДж}.$$

Адказ: $A = 0{,}30$ кДж.

Прыклад 2. Стан ідэальнага газу, узятага ў колькасці $\nu = 1{,}0$ моль пры тэмпературы $T_1 = 300$ K, змяняецца так, як паказана на рысунку 57. Вызначце работу газу ў ходзе ўсяго працэсу, калі на ізахоры $1 \to 2$ яго ціск змяншаецца ў тры разы, а пункты 1 і 3 ляжаць на адной ізатэрме.



Рыс. 57

Дадзена:	
$\nu = 1{,}0$ моль	
$T_1 = 300$ К	
$p_1 = 3p_2$	
$T_1 = T_3$	
A — ?	

Рашэнне. Работа A газу ў ходзе ўсяго працэсу роўная суме работ на ўчастках $1 \to 2$ і $2 \to 3$. Паколькі пры пераходзе са стану 1 у стан 2 аб'ём газу не змяняецца (працэс ізахорны $V_2 = V_1$), то работа газу $A_{12} = 0$. Ціск газу пры пераходзе са стану 2 у стан 3 застаецца пастаянным ($p_2 = p_3$). Значыць, работа газу $A_{23} = p_2(V_3 - V_1)$. Тады $A = A_{12} + A_{23} = p_2(V_3 - V_1)$.

Паколькі па ўмове $T_1 = T_3$, то выкарыстаем ураўненне Клапейрона (5.2): $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_3}{T_3}$, адкуль $V_3 = \frac{p_1}{p_2}V_1 = 3V_1$. Такім чынам, $A = p_2(3V_1 - V_1) = 2p_2V_1 = \frac{2p_1V_1}{3}$. Згодна з ураўненнем Клапейрона—Мендзялеева $p_1V_1 = \nu RT_1$.

Тады $A = \frac{2}{3}\nu RT_1$.

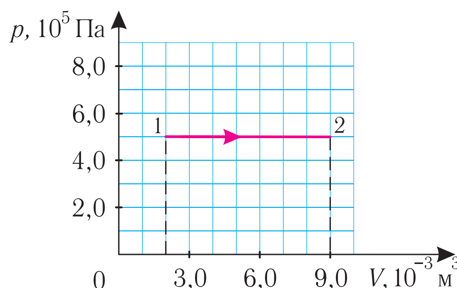
$$A = \frac{2 \cdot 1{,}0\ \text{моль} \cdot 8{,}31\ \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 300\ \text{К}}{3} = 1662\ \text{Дж} = 1{,}7\ \text{кДж}.$$

Адказ: $A = 1{,}7$ кДж.

Практыкаванне 8

1. Газ, ціск якога $p = 0{,}10$ МПа, ізабарна расшыраецца. Пры гэтым сіла ціску газу выконвае работу $A = 40$ Дж. Вызначце, на колькі павялічыўся аб'ём газу.

2. На рысунку 58 адлюстраваны графік залежнасці ціску газу ад аб'ёму. Вызначце работу, выкананую сілай ціску газу пры расшырэнні.



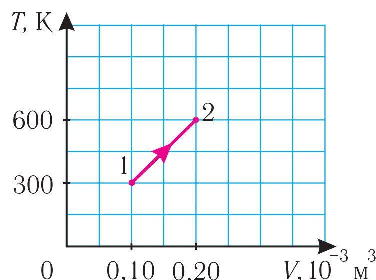
Рыс. 58

3. Пры ізабарным павелічэнні тэмпературы азоту на $\Delta T = 180$ К сілай яго ціску выканана работа $A = 25$ кДж. Вызначце масу азоту.

4. Ідэальны газ пэўнай масы пры тэмпературы $T_1 = 290$ К і ціску $p = 0{,}20$ МПа займае аб'ём $V_1 = 0{,}10$ м^3. Вызначце работу, выкананую сілай ціску газу пры яго ізабарным награванні да тэмпературы $T_2 = 370$ К.

5. На рысунку 59 адлюстраваны графік расшырэння ідэальнага газу, узятага ў колькасці $\nu = 1,0$ моль. Вызначце работу, выкананую сілай ціску газу пры яго пераходзе са стану *1* у стан *2*.

6*. Гелій, узяты ў колькасці $\nu = 2,00$ моль, ізабарна расшыраецца. Пры гэтым сіла ціску газу выконвае работу $A = 7,20$ кДж. Вызначце пачатковую тэмпературу гелію, калі яго маса не змяняецца, а канцэнтрацыя малекул у канчатковым стане ў тры разы меншая, чым у пачатковым.



Рыс. 59

§ 11. Першы закон тэрмадынамікі. Прымяненне першага закона тэрмадынамікі да ізапрацэсаў у ідэальным газе. Адыябатны працэс

Пры вывучэнні фізікі ў 9 класе вы даведаліся, што поўная механічная энергія замкнутай сістэмы цел захоўваецца толькі пры адсутнасці трэння, а пры наяўнасці трэння яна памяншаецца. Куды дзяецца механічная энергія? Калі бутэльку, запоўненую да паловы вадой пры пакаёвай тэмпературы, падтрэсваць на працягу некалькіх хвілін, то акажацца, што вада нагрэлася на 1—2 °С. Якім чынам нагрэлася вада?

У сярэдзіне XIX стагоддзя вядомы англійскі фізік Дж. Джоўль (1818—1889), правёўшы шматлікія доследы, паказаў, што выкананая пры перамешванні вады механічная работа практычна роўная павелічэнню яе ўнутранай энергіі. Доследы Джоўля, а таксама даследаванні нямецкага ўрача і прыродазнаўцы Р. Маера (1814—1878), нямецкага прафесара фізіялогіі і аднаго з самых знакамітых фізікаў другой паловы XIX стагоддзя Г. Гельмгольца (1821—1894) дазволілі сфармуляваць закон захавання і ператварэння энергіі, распаўсюдзіўшы яго на ўсе з'явы прыроды. Паводле гэтага закона **пры любых узаемадзеяннях матэрыяльных аб'ектаў энергія не знікае і не ўзнікае з нічога, яна толькі перадаецца ад адных аб'ектаў да другіх або ператвараецца з адной формы ў другую.**

Для тэрмадынамічных сістэм (у тэрмадынаміцы звычайна разглядаюць макраскапічна нерухомыя сістэмы) закон захавання і ператварэння энергіі называюць *першым законам тэрмадынамікі*. Паводле першага закона тэрмадынамікі **прырашчэнне ўнутранай энергіі тэрмадынамічнай сістэмы пры пераходзе з аднаго стану ў другі роўнае алгебраічнай суме работы, выкананай знешнімі сіламі, і колькасці цеплаты, атрыманай або аддадзенай сістэмай пры ўзаемадзеянні са знешнімі целамі:**

$$\Delta U = A' + Q. \qquad (11.1)$$

Паколькі работа знешніх сіл роўная рабоце, якая выконваецца тэрмадынамічнай сістэмай, узятай з супрацьлеглым знакам ($A' = -A$), то першы закон тэрмадынамікі можна сфармуляваць інакш: **колькасць цеплаты, атрыманая або аддадзеная тэрмадынамічнай сістэмай пры ўзаемадзеянні са знешнімі целамі пры яе пераходзе з аднаго стану ў другі, ідзе на прырашчэнне ўнутранай энергіі сістэмы і на работу, якую яна выконвае пры расшырэнні**:

$$Q = \Delta U + A. \qquad (11.2)$$

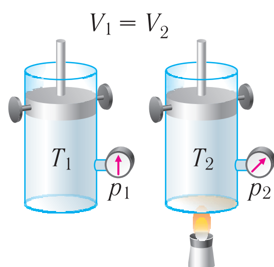
Калі сістэма ўяўляе сабой дзеючае ўстройства, якое перыядычна вяртаецца ў зыходны стан, то пры гэтым $\Delta U = 0$ і $A = Q$. Механізм, які мог бы выконваць работу без змянення стану цел, што яго складаюць, і без цеплаперадачы ад знешніх цел, называюць «вечным рухавіком першага роду». Таму першы закон тэрмадынамікі можна сфармуляваць і наступным чынам: *немагчыма стварыць вечны рухавік першага роду*, г. зн. такі рухавік, які пры нязменным значэнні ўласнай унутранай энергіі выконваў бы работу большую, чым энергія, якую ён атрымлівае звонку.

Прыменім першы закон тэрмадынамікі да розных ізапрацэсаў, што адбываюцца з ідэальным аднаатамным газам.

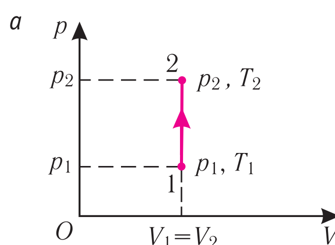
Ізахорны працэс. Няхай ідэальны аднаатамны газ знаходзіцца ў цыліндрычнай пасудзіне, якая закрыта нерухомым поршнем ($V = \text{const}$). Нагрэем пасудзіну з газам. Аб'ём газу застаецца практычна пастаянным (цеплавое расшырэнне пасудзіны не ўлічваем) (рыс. 60). Значыць, работа сілы ціску газу $A = 0$. Тады першы закон тэрмадынамікі набудзе выгляд

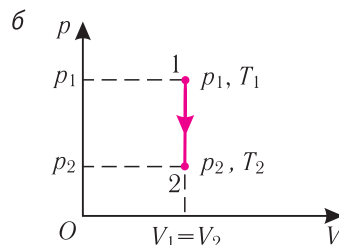
$$Q = \Delta U. \qquad (11.3)$$

Гэта азначае, што ўся колькасць цеплаты, якая перадаецца газу, ідзе на павелічэнне яго ўнутранай энергіі. Пры гэтым прырашчэнне ўнутранай энергіі газу $\Delta U = \frac{3}{2}\nu R\Delta T > 0$ ($T_2 > T_1$) (рыс. 61, *а*). А калі газ пры ізахорным



Рыс. 60





Рыс. 61

працэсе аддае колькасць цеплаты, то яго ўнутраная энергія змяншаецца: $\Delta U = \frac{3}{2}\nu R\Delta T < 0$ $(T_2 < T_1)$ (рыс. 61, *б*).

Ізатэрмічны працэс. Няхай цыліндрычная пасудзіна з газам пад поршнем знаходзіцца ў тэрмастаце — устройстве, у якім падрымліваецца пастаянная тэмпература. У гэтым выпадку ўнутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу $U = \frac{3}{2}\nu RT$ застаецца пастаяннай, а яе змяненне $\Delta U = 0$. Тады першы закон тэрмадынамікі набудзе выгляд

$$\boldsymbol{Q = A.} \qquad (11.4)$$

Якія вывады вынікаюць з гэтага? Калі з дапамогай знешняга ўстройства павольна перамяшчаць поршань у пасудзіне так, каб аб'ём газу павялічваўся ($\Delta V > 0$, поскольку $V_2 > V_1$) (рыс. 62), то работа сілы ціску газу пры расшырэнні $A > 0$ (рыс. 63, *а*). Пры аднолькавай першапачатковай тэмпературы тэрмастата і газу цеплаперадачы не адбываецца. Дадатная работа сілы ціску газу, які расшыраецца, выконваецца за кошт памяншэння яго ўнутранай энергіі, а значыць, і тэмпературы. Адразу ж узнікае цеплаперадача ад тэрмастата да газу. Пры павольным перамяшчэнні поршня ў пасудзіне тэмпературы газу і тэрмастата паспяваюць выраўняцца. Адбываецца працэс, блізкі да ізатэрміч-

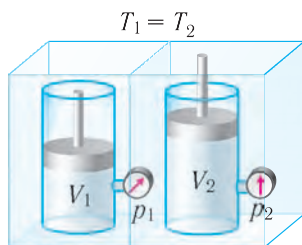
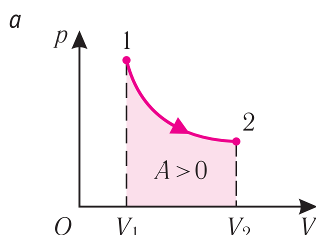


Рис. 62



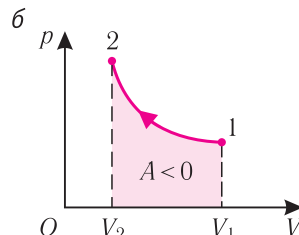


Рис. 63

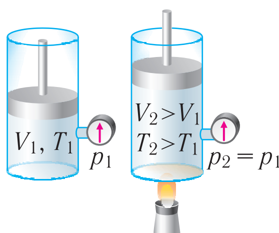
нага, пры якім газ падчас расшырэння атрымлівае некаторую колькасць цеплаты ($Q > 0$) ад тэрмастата.

Калі ж знешні механізм забяспечвае павольнае змяншэнне аб'ёму газу ў пасудзіне ($\Delta V < 0$, паколькі $V_2 < V_1$), то работа сілы ціску пры сцісканні газу $A < 0$ (рыс. 63, *б*) прыводзіць да павелічэння ўнутранай энергіі газу, а значыць, і яго тэмпературы. У выніку ўзнікае цеплаперадача ад газу да тэрмастата. Пры сцісканні газ аддае тэрмастату некаторую колькасць цеплаты $Q < 0$. Такім чынам, ізатэрмічнае сцісканне газу адбываецца за кошт работы знешніх сіл: $A' > 0$.

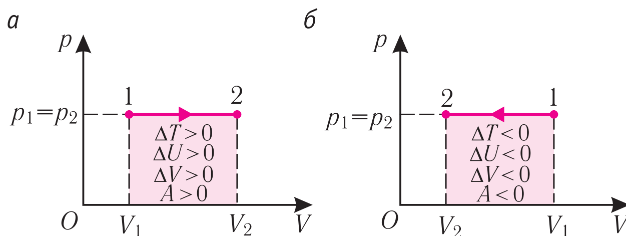
Ізабарны працэс. Няхай газ знаходзіцца ў цыліндрычнай пасудзіне, закрытай поршнем, які можа свабодна або пад пастаяннай нагрузкай перамяшчацца (рыс. 64). Нагрэем газ, перадаўшы яму некаторую колькасць цеплаты ($Q > 0$). Паводле першага закона тэрмадынамікі (11.2) перададзеная газу колькасць цеплаты часткова расходуецца на павелічэнне ўнутранай энергіі ($\Delta U > 0$) сістэмы і часткова ідзе на выкананне работы сілай ціску газу пры яго расшырэнні ($A > 0$) (рыс. 65, *а*): $Q = ДU + A$.

Пры ізабарным працэсе работа расшырэння (сціскання) газу $A = p\Delta V \neq 0$, і першы закон тэрмадынамікі набывае наступны выгляд:

$$\boldsymbol{Q = \Delta U + p\Delta V.} \qquad (11.5)$$



Рыс. 64



Рыс. 65

Пры ізабарным сцісканні газу знешнія сілы выконваюць работу $A' > 0$. Каб ціск газу пры гэтым заставаўся пастаянным, газ неабходна ахалоджваць, г. зн. ён павінен аддаваць у навакольнае асяроддзе некаторую колькасць цеплаты ($Q < 0$). Паніжэнне тэмпературы газу пры ізабарным сцісканні прыводзіць да памяншэння яго ўнутранай энергіі ($\Delta U < 0$). Работа сілы ціску газу пры сцісканні $A < 0$ (рыс. 65, *б*).

Удзельная цеплаёмістасць рэчыва залежыць не толькі ад яго ўласцівасцей, але і ад характару ажыццяўлення працэсу цеплаперадачы. Сапраўды, з формулы (10.4) вынікае, што ўдзельная цеплаёмістасць $c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{\Delta U + A}{m\Delta T}$.

Тады згодна з першым законам тэрмадынамікі пры ізахорным працэсе (11.3) удзельная цеплаёмістасць ідэальнага газу $c_V = \frac{\Delta U}{m\Delta T}$, а пры ізабарным (11.5) — $c_p = \frac{\Delta U + p\Delta V}{m\Delta T}$. Такім чынам, для аднолькавага павелічэння тэмпературы пры ізабарным награванні адзінцы масы газу неабходна перадаць большую колькасць цеплаты, чым пры ізахорным награванні, г. зн. $c_p > c_V$.

Гэта тлумачыцца тым, што пры пастаянным ціску частка падведзенай энергіі расходуецца на выкананне сілай ціску газу работы пры расшырэнні.

Расшырэнне вадкіх і цвёрдых цел падчас награвання пры пастаянным ціску значна меншае, чым газаў, таму для іх $A << \Delta U$ і іх удзельныя цеплаёмістасці мала залежаць ад характару працэсу ($c_p \approx c_V$).

Адыябатны працэс. *Адыябатным* называюць працэс, у ходзе якога тэрмадынамічная сістэма не атрымлівае і не аддае энергію шляхам цеплаперадачы. Такім чынам, пры адыябатным працэсе

$$Q = 0.$$

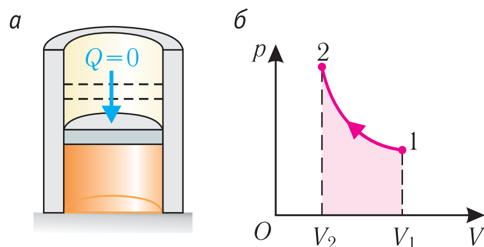
Прымяняючы да гэтага працэсу першы закон тэрмадынамікі, атрымаем:

$$\boldsymbol{\Delta U = -A,} \quad (11.6)$$

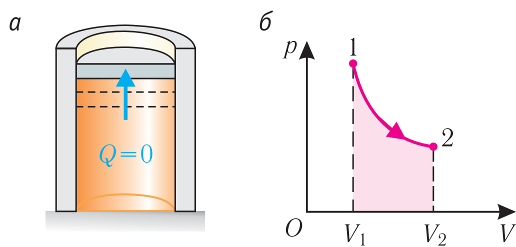
або $A = -\Delta U$.

Пры адыябатным працэсе змяненне ўнутранай энергіі сістэмы адбываецца толькі за кошт выканання работы. Калі знешнія сілы выконваюць работу па сцісканні газу ($\Delta V < 0$, $A < 0$) (рыс. 66, *а, б*), то ўнутраная энергія газу павялічваецца ($\Delta U > 0$), газ награваецца. Калі сіла ціску газу выконвае работу па расшырэнні ($\Delta V > 0$, $A > 0$) (рыс. 67, *а, б*), то ўнутраная энергія газу памяншаецца ($\Delta U < 0$), газ ахалоджваецца.

На практыцы адыябатны працэс ажыццяўляецца галоўным чынам не за кошт цеплаізаляцыі (нельга акружыць сістэму абалонкай, якая абсалютна не

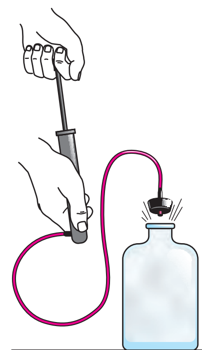


Рыс. 66



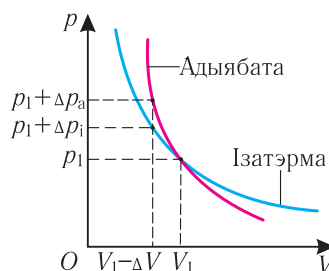
Рыс. 67

дапускае цеплаперадачы), а за кошт хуткасці праходжання працэсу. Калі працэс ідзе вельмі хутка, то цеплаперадача практычна не адбываецца. Можна правесці вельмі наглядны дослед, які ілюструе памяншэнне тэмпературы газу пры яго адыябатным расшырэнні. Выкарыстоўваючы помпу, праз адтуліну ў корку будзем напампоўваць у шкляную пасудзіну паветра (рыс. 68). Праз некаторы прамежак часу напампоўвання сціснутае паветра выканае работу па пераадоленні сілы трэння, з якой сценкі пасудзіны дзейнічаюць на корак, і сілы атмасфернага ціску. Цеплаперадача паміж пасудзінай і целамі, што яе акружаюць, не паспявае праявіцца за той малы прамежак часу, пакуль корак вылятае з пасудзіны. Памяншэнне ўнутранай энергіі паветра ў пасудзіне выяўляецца ў паніжэнні яго тэмпературы, што прыводзіць да кандэнсацыі вадзяной пары, г. зн. да ўтварэння туману.


Рыс. 68

У якасці прыкладу адыябатнага працэсу можна прывесці ахаладжэнне паветра ў атмасферы. Нагрэтае каля паверхні Зямлі паветра падчас хуткага пад'ёму ў верхнія слаі атмасферы расшыраецца амаль адыябатна і пры гэтым рэзка ахалоджваецца. Вадзяная пара ў ім кандэнсуецца ў маленькія кроплі вады і крышталікі лёду, утвараючы воблакі. Блізкі да адыябатнага працэс выкарыстоўваюць у рухавіках унутранага згарання.

Абарачальны адыябатны працэс адносяць да ізапрацэсаў, паколькі ён характарызуецца пастаянствам функцыі стану, якую называюць энтрапіяй. У адрозненне ад астатніх ізапрацэсаў пры абарачальным адыябатным працэсе адбываюцца змены ціску, аб'ёму і тэмпературы. Графік адыябатнага працэсу ў каардынатах (p, V) падобны на графік ізатэрмічнага працэсу (рыс. 69). Аднак аднаму і таму ж змяненню аб'ёму ΔV пры адыябатным працэсе адпавядае большае змяненне ціску, чым пры ізатэрмічным: $|\Delta p_a| > |\Delta p_i|$ (гл. рыс. 69). Гэта тлумачыцца тым, што ў выпадку адыябатнага расшырэння ціск $p = nkT$ змяншаецца не толькі за кошт павелічэння аб'ёму газу (памяншэння канцэнтрацыі часціц), але і за кошт памяншэння тэмпературы. Пры ізатэрмічным расшырэнні ціск газу змяншаецца толькі за кошт памяншэння канцэнтрацыі часціц.



Рыс. 69

1. Прырашчэнне ўнутранай энергіі тэрмадынамічнай сістэмы пры пераходзе з аднаго стану ў другі роўнае алгебраічнай суме работы, выкананай знешнімі сіламі, і колькасці цеплаты, атрыманай або аддадзенай сістэмай пры ўзаемадзеянні са знешнімі целамі:

$$\Delta U = A' + Q.$$

2. Колькасць цеплаты, атрыманая або аддадзеная тэрмадынамічнай сістэмай пры ўзаемадзеянні са знешнімі целамі пры яе пераходзе з аднаго стану ў другі, ідзе на прырашчэнне ўнутранай энергіі сістэмы і на работу, якую сістэма выконвае пры расшырэнні:

$$Q = \Delta U + A.$$

3. Пры ізахорным працэсе ўся перададзеная сістэме колькасць цеплаты ідзе на павелічэнне яе ўнутранай энергіі:

$$Q = \Delta U.$$

4. Пры ізатэрмічным працэсе работа расшырэння або сціскання ідэальнага газу суправаджаецца цеплаперадачай паміж газам і тэрмастатам:

$$A = Q.$$

5. Пры ізабарным працэсе перададзеная ідэальнаму газу колькасць цеплаты часткова расходуецца на павелічэнне ўнутранай энергіі газу і часткова ідзе на выкананне работы газам пры яго расшырэнні:

$$Q = \Delta U + p\Delta V.$$

6. Пры адыябаным працэсе прырашчэнне ўнутранай энергіі газу роўнае рабоце, якую выконвае сіла ціску газу, узятай з супрацьлеглым знакам:

$$\Delta U = -A.$$

1. Прывядзіце дзве фармулёўкі першага закона тэрмадынамікі.

2. У якіх выпадках змяненне ўнутранай энергіі ідэальнага газу адмоўнае?

3. Чаму немагчыма стварыць «вечны рухавік першага роду»?

4. Які працэс змянення стану газу называюць адыябатным? Як гэты працэс можна ажыццявіць?

5. На што расходуецца колькасць цеплаты, якую перадаюць сістэме, пры ізатэрмічным, ізабарным і ізахорным працэсах?

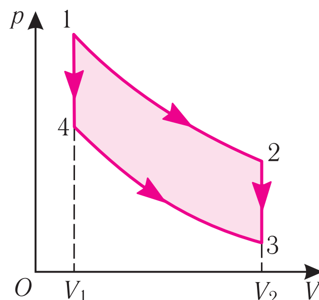
6. Пры хуткім сцісканні газу адбылося павышэнне яго тэмпературы. Ці азначае гэта, што газу перадалі некаторую колькасць цеплаты? Ці можна сцвярджаць, што ўнутраная энергія газу павялічылася?

7*. Ці можна перадаць газу некаторую колькасць энергіі шляхам цеплаперадачы, не выклікаючы пры гэтым павышэння яго тэмпературы? Прывядзіце прыклады.

8*. У § 10 мы сцвярджалі, што работа, якая выконваецца пры пераходзе сістэмы з аднаго стану ў другі, з'яўляецца функцыяй працэсу, г. зн. залежыць не толькі ад пачатковага і канчатковага станаў, але і ад віду працэсу. Выкарыстоўваючы першы закон тэрмадынамікі, дакажыце, што колькасць цеплаты, якую атрымлівае або аддае сістэма пры пераходзе з аднаго стану ў другі, таксама з'яўляецца функцыяй працэсу.

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Ідэальны газ, маса якога пастаянная, пераводзяць са стану *1* у стан *3* двума рознымі спосабамі: $1 \to 2 \to 3$ і $1 \to 4 \to 3$ (рыс. 70), дзе $1 \to 2$ і $4 \to 3$ — ізатэрмы, а $2 \to 3$ і $1 \to 4$ — ізахоры. Ці аднолькавыя пры кожным пераходзе: а) прырашчэнні ўнутранай энергіі газу; б) работы, якія выконваюць сілы ціску газу; в) колькасці цеплаты, перададзеныя газу?



Рыс. 70

Р а ш э н н е. а) Паколькі пачатковы і канчатковы станы для абодвух пераходаў аднолькавыя, то будуць аднолькавымі і прырашчэнні ўнутранай энергіі:

$$\Delta U_{123} = \Delta U_{143} = U_3 - U_1.$$

б) З рысунка 70 бачна, што плошча фігуры, абмежаванай воссю *OV*, ізатэрмай і ізахорамі, якія праходзяць праз пункты *3* і *4*, меншая за плошчу, абмежаваную воссю *OV*, ізатэрмай і ізахорамі, якія праходзяць праз пункты *1* і *2*. Значыць, у працэсе пераходу $1 \to 2 \to 3$ сіла ціску газу выконвае большую работу, чым у працэсе пераходу $1 \to 4 \to 3$:

$$A_{123} > A_{143}.$$

в) З першага закона тэрмадынамікі вынікае:

$$Q_{123} = \Delta U + A_{123}, \quad Q_{143} = \Delta U + A_{143}.$$

Паколькі прырашчэнні ўнутранай энергіі ў абодвух выпадках аднолькавыя, а выкананая сілай ціску газу работа большая пры пераходзе $1 \to 2 \to 3$, то колькасць цеплаты, перададзеная газу, пры пераходзе $1 \to 2 \to 3$ таксама будзе большая: $Q_{123} > Q_{143}$.

А д к а з: а) $\Delta U_{123} = \Delta U_{143}$; б) $A_{123} > A_{143}$; в) $Q_{123} > Q_{143}$.

Прыклад 2. Ідэальны аднаатамны газ, ціск якога $p = 2{,}0 \cdot 10^5$ Па, ізабарна расшыраецца так, што яго аб'ём узрастае на $\Delta V = 0{,}40$ м^3. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі газу і колькасць цеплаты, атрыманую газам у гэтым працэсе.

Дадзена:	
$p = 2{,}0 \cdot 10^5$ Па	
$\Delta V = 0{,}40$ м^3	
$p = \text{const}$	
ΔU — ? Q — ?	

Рашэнне. Прырашчэнне ўнутранай энергіі ідэальнага аднаатамнага газу $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T$. Пры ізабарным расшырэнні змяненне тэмпературы ΔT ідэальнага газу звязана са змяненнем аб'ёму ΔV газу суадносінай $\frac{m}{M}R\Delta T = p\Delta V$ (гл. прыклад рашэння задачы пасля § 9). Тады $\Delta U = \frac{3}{2}p\Delta V$. Паводле першага закона тэрмадынамікі для ізабарнага працэсу $Q = \Delta U + p\Delta V$.

Адсюль $Q = \frac{3}{2}p\Delta V + p\Delta V = \frac{5}{2}p\Delta V$.

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 2{,}0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0{,}40 \text{ м}^3 = 1{,}2 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0{,}12 \text{ МДж},$$

$$Q = \frac{5}{2} \cdot 2{,}0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0{,}40 \text{ м}^3 = 2{,}0 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0{,}20 \text{ МДж}.$$

Адказ: $\Delta U = 0{,}12$ МДж, $Q = 0{,}20$ МДж.

Прыклад 3. У пасудзіну наліта вада масай $m_1 = 800$ г, тэмпература якой $t_1 = 60$ °C. У ваду дабавілі некаторую колькасць лёду пры тэмпературы $t_2 = -10$ °C. Вызначце масу лёду, калі пасля дасягнення цеплавой раўнавагі тэмпература змесціва пасудзіны $t_3 = 40$ °C. Цеплаёмістасць пасудзіны можна не прымаць пад увагу. Удзельная цеплаёмістасць вады $c_1 = 4{,}2 \cdot 10^3 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, лёду — $c_2 = 2{,}1 \cdot 10^3 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, удзельная цеплата плаўлення лёду $\lambda = 3{,}33 \cdot 10^5 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Дадзена:	
$m_1 = 800$ г $= 0{,}800$ кг	
$t_1 = 60$ °C	
$t_2 = -10$ °C	
$t_3 = 40$ °C	
$c_1 = 4{,}2 \cdot 10^3 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	
$c_2 = 2{,}1 \cdot 10^3 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	
$\lambda = 3{,}33 \cdot 10^5 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	
m_2 — ?	

Рашэнне. Калі не прымаць пад увагу страты энергіі ў навакольнае асяроддзе, то тэрмадынамічная сістэма «пасудзіна — вада — лёд» з'яўляецца ізаляванай. Таму ўлічваем толькі абмен энергіяй паміж целамі, якія ўваходзяць у сістэму, пры цеплаперадачы. Разгледзім цеплавыя працэсы, якія адбываюцца ў сістэме: 1) награванне лёду ад тэмпературы t_2 да тэмпературы плаўлення $t_0 = 0{,}0$ °C: $Q_1 = c_2 m_2 (t_0 - t_2)$; 2) плаўленне лёду: $Q_2 = \lambda m_2$; 3) награванне халоднай вады, якая атрымалася пры плаўленні лёду, ад тэмпературы t_0 да тэмпературы t_3: $Q_3 = c_1 m_2 (t_3 - t_0)$; 4) ахаладжванне цёплай вады масай m_1 ад тэмпературы t_1 да тэмпературы t_3:

$Q_4 = c_1 m_1(t_3 - t_1)$. Складзём ураўненне цеплавога балансу: $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0$, або

$$c_2 m_2(t_0 - t_2) + \lambda m_2 + c_1 m_2(t_3 - t_0) + c_1 m_1(t_3 - t_1) = 0.$$

Адсюль маса лёду $m_2 = \dfrac{c_1 m_1(t_1 - t_3)}{c_2(t_0 - t_2) + \lambda + c_1(t_3 - t_0)}$.

$$m_2 = \frac{4{,}2 \cdot 10^3 \,\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0{,}800\,\text{кг} \cdot (60\,^\circ\text{C} - 40\,^\circ\text{C})}{2{,}1 \cdot 10^3 \,\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot (0{,}0\,^\circ\text{C} + 10\,^\circ\text{C}) + 3{,}33 \cdot 10^5 \,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} + 4{,}2 \cdot 10^3 \,\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot (40\,^\circ\text{C} - 0{,}0\,^\circ\text{C})} =$$
$$= 0{,}13\ \text{кг}.$$

Адказ: $m_2 = 0{,}13$ кг.

Практыкаванне 9

1. Здзейсніўшы цыклічны працэс, ідэальны газ вяртаецца ў зыходны стан. Вызначце работу газу ў гэтым працэсе, калі алгебраічная сума колькасці атрыманай і аддадзенай цеплаты $Q = 84$ Дж.

2. Пры адыябатным расшырэнні сілай ціску газу выканана работа $A = 265$ Дж. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі газу. Як змянілася тэмпература газу?

3. Вызначце колькасць цеплаты, перададзеную кіслароду, калі пры ізатэрмічным расшырэнні работа, выкананая сілай ціску газу, $A = 6{,}4$ кДж.

4. У герметычна закрытым балоне знаходзіцца азот масай $m = 4{,}00$ кг. Вызначце колькасць цеплаты, якую неабходна перадаць азоту для павышэння яго тэмпературы на $\Delta T = 120$ К, калі ўдзельная цеплаёмістасць азоту пры пастаянным аб'ёме $c_V = 745\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

5. Пры перадачы ідэальнаму аднаатамнаму газу колькасці цеплаты $Q = 60$ Дж яго тэмпература павялічылася пры пастаянным ціску на $\Delta T = 10$ К. Вызначце колькасць рэчыва газу.

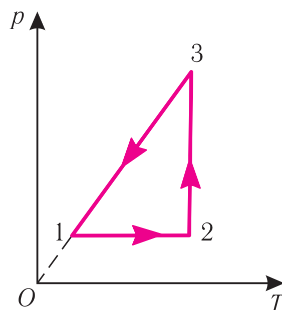
6. Пры ізабарным расшырэнні гелію масай $m = 20$ г яго аб'ём павялічыўся ў два разы. Вызначце работу, выкананую сілай ціску пры расшырэнні газу, і колькасць цеплаты, перададзеную газу, калі яго пачатковая тэмпература $T_1 = 300$ К.

7. Пры ізабарным расшырэнні сілай ціску ідэальнага аднаатамнага газу выканана работа $A = 50{,}0$ кДж. Вызначце павелічэнне ўнутранай энергіі газу і колькасць цеплаты, перададзеную гэтаму газу.

8. У пасудзіну, якая змяшчае ваду аб'ёмам $V_1 = 3{,}2$ л пры тэмпературы $t_1 = 20\,^\circ$C, кінулі кавалак сталі масай $m_2 = 4{,}0$ кг, нагрэты да тэмпературы

$t_2 = 360$ °C. У выніку цеплаабмену вада нагрэлася да тэмпературы $t_3 = 50$ °C, а частка яе ператварылася ў пару. Вызначце масу вады, якая ператварылася ў пару. Цеплаёмістасць пасудзіны можна не ўлічваць. Для вады: удзельная цеплаёмістасць $c_1 = 4{,}2 \cdot 10^3\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, шчыльнасць $\rho_1 = 1{,}0 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, удзельная цеплата параўтварэння $L_1 = 2{,}26 \cdot 10^6\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, тэмпература кіпення $t_\text{к} = 100$ °C. Удзельная цеплаёмістасць сталі $c_2 = 4{,}6 \cdot 10^2\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

9*. З ідэальным газам пэўнай масы ажыццявілі працэс, графік якога паказаны на рысунку 71. Вызначце: а) на якіх участках графіка работа газу дадатная; б) на якіх участках графіка газ атрымліваў энергію, а на якіх — аддаваў.



Рыс. 71

10*. Гелій, колькасць рэчыва якога $\nu = 2{,}0$ моль, што знаходзіцца пры тэмпературы $T = 300$ К, спачатку ізабарна награваюць, а затым ізахорна пераводзяць у стан з тэмпературай, роўнай пачатковай. Вызначце, у колькі разоў павялічыўся аб'ём гелію, калі алгебраічная сума колькасці атрыманай і аддадзенай газам цеплаты $Q = 4{,}2$ кДж.

§ 12. Цеплавыя рухавікі. Прынцып дзеяння цеплавых рухавікоў і іх ККД. Экалагічныя праблемы выкарыстання цеплавых рухавікоў

Людзі даўно навучыліся выкарыстоўваць змяненне ўнутранай энергіі цела, якое адбываецца пры выкананні механічнай работы. Напрыклад, можна сагрэць рукі, паціраючы далоні адна аб адну, ці здабыць агонь трэннем аднаго кавалка дрэва аб другі. Значна больш часу спатрэбілася чалавецтву ў працэсе свайго развіцця, каб навучыцца выкарыстоўваць механічную работу, атрыманую шляхам перадачы целу некаторай колькасці цеплаты. Толькі ў 1765 г., параўнальна нядаўна па гістарычных мерках, рускаму вынаходніку І. І. Паўзунову ўдалося стварыць першае практычна карыснае ўніверсальнае ўстройства для ажыццяўлення гэтай мэты — паравую машыну. Вынаходства паравой машыны, а пасля і рухавіка ўнутранага згарання французскім інжынерам Э. Ленуарам у 1860 г. мела выключна важнае значэнне. Цяпер цяжка ўявіць наша жыццё без аўтамабіляў, самалётаў, караблёў і іншых

складаных канструкцый, у якіх унутраная энергія спаленага паліва і яго акісляльніка часткова пераўтворыцца ў механічную работу.

Неабарачальнасць працэсаў у прыродзе. Першы закон тэрмадынамікі не дазваляе вызначыць, у якім напрамку можа ісці тэрмадынамічны працэс. Першы закон тэрмадынамікі дапускае самаадвольны пераход энергіі як ад больш нагрэтага цела да менш нагрэтага, так і наадварот. Мае значэнне толькі ўмова, каб змяншэнне ўнутранай энергіі аднаго цела было роўным павелічэнню ўнутранай энергіі другога цела. Аднак у прыродзе самаадвольны пераход энергіі ад менш нагрэтага да больш нагрэтага цела не адбываецца. Напрыклад, немагчыма назіраць, каб пры апусканні халоднай лыжкі ў гарачы чай лыжка ахаладжвалася яшчэ больш, перадаючы некаторую колькасць цеплаты гарачаму чаю. На самай справе заўсёды некаторая колькасць цеплаты самаадвольна пераходзіць ад гарачага чаю да халоднай лыжкі, пакуль у сістэме «чай—лыжка» не ўсталюецца цеплавая раўнавага з аднолькавай тэмпературай усёй сістэмы.

Сцверджанне, выказанае Р. Клаузіусам у 1850 г. аб тым, што немагчыма самаадвольная перадача колькасці цеплаты ад менш нагрэтага цела да больш нагрэтага, носіць назву *другога закона тэрмадынамікі*.

Такім чынам, другі закон тэрмадынамікі канстатуе той факт, што *колькасць цеплаты самаадвольна можа пераходзіць толькі ад больш нагрэтых цел да менш нагрэтых*. Гэты навуковы факт і вызначае адзіна магчымы напрамак самаадвольнага праходжання цеплавых працэсаў — яны ідуць у напрамку стану цеплавой раўнавагі.

Гэты ж закон у 1851 г. сфармуляваў і У. Томсан: «Немагчыма пры дапамозе неадушаўлёнага матэрыяльнага дзеяча атрымаць ад якой-небудзь масы рэчыва механічнае дзеянне шляхам ахаладжэння яе ніжэй за тэмпературу самага халоднага з прадметаў што яе акружаюць».

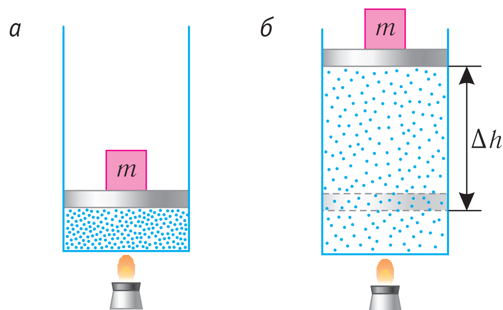
Адзначым, што ў халадзільных установках працэс цеплаперадачы ідзе ад больш халоднага цела да менш халоднага. У прадукта, які ахалоджваецца, памяншаецца ўнутраная энергія, а значыць, і яго тэмпература, і змяншэнне ўнутранай энергіі ў выглядзе колькасці цеплаты перадаецца ў навакольнае асяроддзе (з больш высокай, чым у прадукта, тэмпературай). Але гэты працэс перадачы колькасці цеплаты не самаадвольны, ён адбываецца за кошт работы рухавіка кампрэсара халадзільніка.

Цеплавыя рухавікі. Як ужо адзначалася ў § 11, у адыябатным працэсе сіла ціску газу выконвае работу за кошт змянення яго ўнутранай энергіі, а ў ізатэрмічным працэсе — за кошт цеплаперадачы паміж тэрмастатам і газам. Адыябатны і ізатэрмічны працэсы расшырэння газу дазваляюць выкарыстоўваць частку ўнутранай энергіі спаленага паліва для выканання механічнай

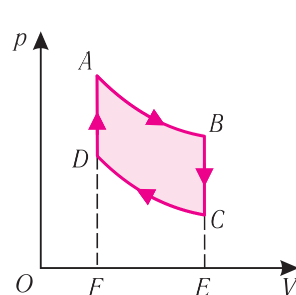
работы. Рухавікі, у якіх адбываецца ператварэнне часткі ўнутранай энергіі спаленага паліва і яго акісляльніка (напрыклад, кіслароду з паветра) у механічную работу, называюць *цеплавымі рухавікамі*.

У якасці спрошчанай мадэлі цеплавога рухавіка разгледзім цыліндрычную пасудзіну, у якой знаходзіцца газ (паветра) пад поршнем. Змесцім на поршань цела масай m і будзем награваць газ у цыліндры (рыс. 72, *а*). Ціск газу пачынае ўзрастаць, поршань прыходзіць у рух і падымае цела на некаторую вышыню Δh (рыс. 72, *б*). Аб'ём газу павялічваецца, г. зн. сіла ціску газу выконвае работу ($A > 0$). Але ў дадзеным выпадку ўстройству ўласціва аднаразовае выкананне работы. Зразумела, што такія ўстройствы малапрыдатныя. Таму першы прынцып дзеяння цеплавых рухавікоў — цыклічнасць (бесперапыннасць) іх работы. Цела, якое выконвае работу, — *рабочае цела* пасля атрымання колькасці цеплаты Q_1 ад *награвальніка*, які знаходзіцца пры тэмпературы T_1, павінна ў канчатковым выніку вярнуцца ў зыходны стан, каб зноў пачаць такі ж працэс.

Для вяртання поршня ў зыходнае становішча газ неабходна сціснуць да першапачатковага аб'ёму. Пры гэтым знешняя сіла выконвае работу сціскання. Але калі сціскане будзе адбывацца пры той жа тэмпературы, што і расшырэнне газу, то работа знешніх сіл будзе роўная рабоце сілы ціску газу пры яго расшырэнні. У выніку поўная работа газу за адзін цыкл (расшырэнне — сціскане) акажацца роўнай нулю. Адсюль вынікае другі прынцып дзеяння цеплавых рухавікоў — сціскане газу павінна адбывацца пры больш нізкай тэмпературы T_2, чым яго расшырэнне (рыс. 73). З рысунка бачна, што ў гэтым выпадку поўная работа газу за цыкл дадатная ($A > 0$) і лікава роўная плошчы фігуры $ABCD$: $S_{ABCD} = S_{ABEF} - S_{DCEF}$.



Рыс. 72

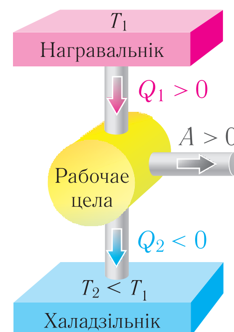


Рыс. 73

Такім чынам, перад сцісканнем рабочае цела неабходна ахаладзіць. Гэта ажыццяўляецца шляхам перадачы колькасці цеплаты Q_2 трэцяму целу — *халадзільніку*. Са сказанага вынікае, што для работы цыклічнага цеплавога

рухавіка акрамя награвальніка і рабочага цела неабходна наяўнасць халадзільніка.

Схема цеплавога рухавіка прыведзена на рысунку 74. Цеплавы рухавік складаецца з награвальніка, рабочага цела (як правіла, газ) і халадзільніка (атмасфера або вада пры тэмпературы навакольнага асяроддзя — каля 300 К). Энергія, якая выдзяляецца пры згаранні паліва ў награвальніку, перадаецца рабочаму целу (газу) шляхам цеплаперадачы. Пры расшырэнні газу частка яго ўнутранай энергіі ідзе на выкананне работы. Некаторая колькасць цеплаты непазбежна перадаецца халадзільніку.

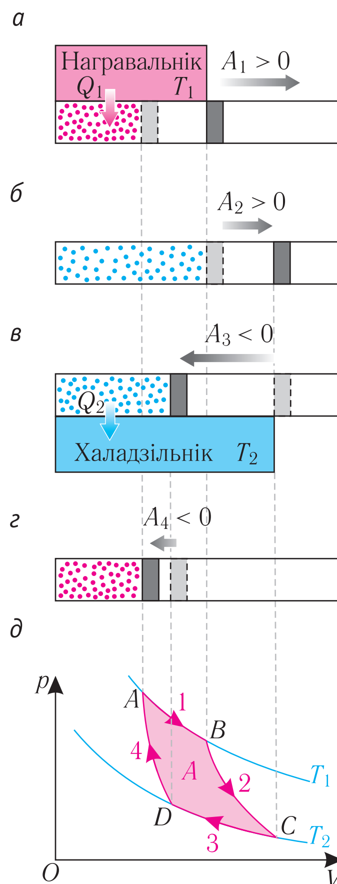


Рыс. 74

! Найбольш эфектыўна ахаладзіць рабочае цела перад сцісканнем можна шляхам адыябатнага расшырэння газу, пры якім яго тэмпература панізіцца да тэмпературы халадзільніка T_2. Далей пры ізатэрмічным сцісканні рабочае цела перадае халадзільніку колькасць цеплаты Q_2. Завяршыць цыкл цеплавога рухавіка эфектыўней за ўсё адыябатным сцісканнем газу да тэмпературы T_1.

Такім чынам, пры рабоце разгледжанага цеплавога рухавіка адбываюцца наступныя працэсы (рыс. 75): 1) ізатэрмічнае расшырэнне газу ($A \to B$, пры гэтым газ атрымлівае некаторую колькасць цеплаты Q_1 ад першага тэрмастата з тэмпературай T_1 — награвальніка); 2) адыябатнае расшырэнне газу ($B \to C$, тэмпература газу паніжаецца да тэмпературы T_2 ($T_2 < T_1$)); 3) ізатэрмічнае сцісканне пры тэмпературы T_2 ($C \to D$, газ прыводзяць у судакрананне з другім тэрмастатам — халадзільнікам, тэмпература якога T_2, пры сцісканні некаторая колькасць цеплаты Q_2 перадаецца ад газу халадзільніку); 4) адыябатнае сцісканне газу да першапачатковага аб'ёму ($D \to A$, тэмпература газу павялічваецца да T_1).

Цыкл работы цеплавога рухавіка, які адпавядае адлюстраванаму на рысунку 75, называюць *цыклам Карно* (у гонар французскага фізіка і інжынера С. Карно (1796—1832)). Прычым Карно разгледзеў ідэальны цыкл, у якім не ўлічваў страты энергіі, абумоўленыя няпоўным згараннем паліва і трэннем (у тым ліку і вязкім у патоках газу), а таксама неізатэрмічнасць і неадыябатнасць працэсаў сціскання і расшырэння ў рэальных цеплавых рухавіках.



Рыс. 75

Каэфіцыент карыснага дзеяння (ККД) цеплавога рухавіка. *Каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка* — адносіна карысна выкарыстанай энергіі $E_{\text{карысн}}$ да агульнай колькасці энергіі E, атрыманай сістэмай:

$$\eta_{э} = \frac{E_{\text{карысн}}}{E}.$$

Вызначаны такім чынам ККД цеплавых рухавікоў называюць *эфектыўным ККД*. Пры гэтым $E = Q_{\text{поўн}}$, дзе $Q_{\text{поўн}}$ — колькасць цеплаты, якая выдзяляецца пры поўным згаранні паліва.

Ступень дасканаласці пераўтварэння пэўнай часткі ўнутранай энергіі награвальнікаў у механічную работу, што адбываецца ў цыліндрах цеплавога рухавіка, характарызуюць *тэрмічным (тэрмадынамічным) каэфіцыентам карыснага дзеяння* $\eta_t = \frac{A_{\text{ц}}}{Q_1}$, дзе $A_{\text{ц}}$ — работа, выкананая рабочым целам за цыкл, Q_1 — колькасць цеплаты, атрыманая рабочым целам ад награвальніка за цыкл. Калі Q_2 — колькасць цеплаты, аддадзеная рабочым целам халадзільніку ($Q_2 < 0$), то $A_{\text{ц}} = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$ і

$$\eta_t = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}. \qquad (12.1)$$

З формулы (12.1) вынікае, што тэрмічны ККД цеплавога рухавіка залежыць ад працэсаў, у якіх удзельнічае рабочае цела, і заўсёды меншы за адзінку. Рэальныя цеплавыя рухавікі маюць наступныя сярэднія значэнні тэрмічнага ККД: дызельны рухавік — 40 %; газатурбінныя ўстаноўкі — 25—30 %; паравая турбіна — 40 %.

У 1824 г. Карно даказаў, што каэфіцыент карыснага дзеяння ўсіх абарачальных машын, якія працуюць у ідэнтычных умовах (г. зн. пры аднолькавых тэмпературах награвальніка T_1 і халадзільніка T_2), вызначаецца толькі тэмпературамі награвальніка і халадзільніка і не залежыць ад роду рэчыва рабочага цела. ККД ідэальнага цыкла Карно $\eta_{\text{К}}$ з'яўляецца максімальна магчымым пры зададзеных T_1 і T_2.

$$\eta_{\text{К}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \qquad (12.2)$$

Такім чынам, ККД любога рэальнага цеплавога рухавіка не можа перавышаць ККД ідэальнага цыкла Карно: $\eta < \eta_{\text{К}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

Аналіз апошняй няроўнасці дазваляе выявіць магчымыя шляхі павелічэння ККД цеплавых рухавікоў. Гэта павышэнне тэмпературы награвальніка T_1 і паніжэнне тэмпературы халадзільніка T_2.

ККД ідэальнага цеплавога рухавіка мог бы быць роўны адзінцы, калі б была магчымасць выкарыстаць халадзільнік з тэмпературай, роўнай абсалютнаму нулю ($T_2=0$). У гэтым выпадку $\eta_K=\frac{T_1}{T_1}=1$. Але, як вядома, гэта немагчыма нават тэарэтычна, таму што абсалютнага нуля тэмпературы дасягнуць нельга. Асноўным напрамкам павелічэння ККД цеплавых рухавікоў з'яўляецца павелічэнне рознасці тэмператур T_1-T_2 — награвальніка і халадзільніка.

У аўтамабільных рухавіках унутранага згарання эфекетыўны каэфіцыент карыснага дзеяння вызначаюць па эксперыментальнай механічнай магутнасці P рухавіка і колькасці паліва, якая спальваецца за адзінку часу. Так, калі за прамежак часу t спалена паліва масай m, якое мае ўдзельную цеплату згарання q, то

$$\eta_э=\frac{Pt}{qm}.$$

Са сказанага вышэй можна зрабіць вывад, што $\eta_э<\eta_t$.

Значэнне цеплавых рухавікоў і экалагічныя праблемы іх выкарыстання. Найбольшае значэнне мае выкарыстанне цеплавых рухавікоў у энергетыцы і на транспарце. Цеплавыя рухавікі — паравыя турбіны — ставяць на цеплавых і атамных электрастанцыях, дзе энергія пары ператвараецца ў механічную энергію ротараў генератараў электрычнага току. У першым выпадку пару высокай тэмпературы атрымліваюць за кошт згарання паліва, а ў другім — за кошт энергіі, якая выдзяляецца ў ходзе ядзерных рэакцый.

Вынаходства рухавіка ўнутранага згарання адыграла велізарную ролю ў аўтамабілебудаванні, ва ўдасканаленні сельскагаспадарчай і будаўнічай тэхнікі. Карбюратарныя рухавікі ўнутранага згарання ўстанаўліваць на аўтамабілях, матацыклах, верталётах і самалётах, дызельныя — на цеплаходах, цеплавозах, трактарах, магутных аўтамабілях. Стварэнне рэактыўнага рухавіка дазволіла падняць самалёты на вялікую вышыню, павялічыць скорасць і далёкасць іх палётаў.

Аднак інтэнсіўнае выкарыстанне цеплавых рухавікоў у энергетыцы і на транспарце адмоўна ўплывае на навакольнае асяроддзе.

Падчас работы цеплавых рухавікоў у атмасферу выкідваецца вялікая колькасць гарачай пары або газу, што прыводзіць да цеплавога забруджвання атмасферы. Шырокае выкарыстанне розных відаў паліва цягне за сабой павелічэнне ў атмасферы вуглякіслага газу (дыяксід вугляроду CO_2). Злучаючыся з вадзяной парай у атмасферы, вуглякіслы газ утварае вугальную кіслату, якая нават пры малых канцэнтрацыях, выпадаючы ў выглядзе кіслотнага дажджу, за стагоддзі разбурае цэглу, метал, мармур.

Спальванне паліва на цеплавых электрастанцыях вядзе да назапашвання ў атмасферы чаднага газу (аксід вугляроду CO), які з'яўляецца атрутай для жывых арганізмаў. Напрыклад, пры згаранні 1 т бензіну ўтвараецца 60 кг аксіду вугляроду. Пры рабоце аўтатранспарту разам з аксідам вугляроду ў атмасферу трапляюць злучэнні свінцу. Пры гарэнні паліва выкарыстоўваецца кісларод з атмасферы, што прыводзіць да паступовага памяншэння яго канцэнтрацыі ў паветры і, акрамя таго, утварэння аксідаў азоту (NO_x). Раствараючыся ў дажджавой вадзе, яны ператвараюцца ў азотную кіслату, а рэагуючы з разнастайнымі прымесямі, што змяшчаюцца ў паветры, утвараюць таксічныя злучэнні, які выпадаюць на паверхню вады і сушы з кіслотнымі дажджамі. Гэта прыводзіць да засалення глеб, адкрытых і падземных вадаёмаў, гібелі лясоў, парушэння хімічнага саставу ў экасістэмах. Акрамя таго, у «кіслай» вадзе лепш раствараюцца такія атрутныя рэчывы, як кадмій, ртуць, свінец, якія знаходзяцца ў глебе і донных адкладах, а гэта ўплывае на чысціню вады, якую спажываюць людзі і жывёлы.

Пры палётах самалётаў і запусках ракет адбываецца разбурэнне азонавага слоя атмасферы, які ахоўвае ўсё жывое на Зямлі ад лішку ўльтрафіялетавага выпраменьвання Сонца.

Рашэнне праблем, якія ўзнікаюць пры згаранні паліва ў цеплавых рухавіках, вучоныя і канструктары бачаць у:

а) экалагізацыі тэхналагічных працэсаў (стварэнні безадходных і малаадходных тэхналогій, якія выключаюць пападанне ў атмасферу шкодных рэчываў); ачыстцы газавых выкідаў у атмасферу (улоўліванні і перапрацоўцы вуглякіслага газу, аксідаў азоту і іншых таксічных рэчываў);

б) павелічэнні каэфіцыента карыснага дзеяння цеплавых рухавікоў, у прыватнасці, шляхам стварэння ўмоў для найбольш поўнага згарання паліва;

в) замене цеплавых рухавікоў на больш экалагічна чыстыя рухавікі, напрыклад электрычныя.

Дадаткова да пералічанага ў многіх краінах свету ў заканадаўчым парадку прыняты гранічна дапушчальныя нормы ўтрымання таксічных кампанентаў у выхлапных газах. У Рэспубліцы Беларусь правіламі дарожнага руху забаронена эксплуатацыя аўтамабіляў, утрыманне аксіду вугляроду ў адпрацаваных газах якіх перавышае 1,5 %. Для выяўлення такіх транспартных сродкаў уведзена сістэма інструментальнага кантролю пры праходжанні дзяржаўнага тэхнічнага агляду.

Рацыянальная арганізацыя аўтамабільнага руху ў гарадах (будаўніцтва скарасных магістралей, дадатковых развязак і эстакад, што спрыяе змяншэнню колькасці святлафораў і ліквідацыі затораў) таксама дазволіць зменшыць шкодныя выкіды ў атмасферу пры эксплуатацыі транспартных сродкаў.

1. Працэсы з макраскапічнымі целамі, якія адбываюцца ў прыродзе, неабарачальныя: немагчымы самаадвольны працэс, які суправаджаецца перадачай некаторай колькасці цеплаты ад халоднага цела да гарачага.

2. Рухавікі, у якіх адбываецца ператварэнне часткі ўнутранай энергіі спаленага паліва і яго акісляльніка ў механічную работу, называюць цеплавымі рухавікамі.

3. Тэрмічным каэфіцыентам карыснага дзеяння цеплавога рухавіка называюць адносіну работы, якая выконваецца рабочым целам за цыкл, да колькасці цеплаты, атрыманай за цыкл рабочым целам ад награвальніка:

$$\eta_t = \frac{A_ц}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}.$$

4. Максімальна магчымае значэнне тэрмічнага каэфіцыента карыснага дзеяння ідэальнага цеплавога рухавіка:

$$\eta_К = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

1. Прывядзіце прыклады найбольш тыповых неабарачальных працэсаў.

2. Што называюць цеплавым рухавіком? Якія прынцыпы пакладзены ў аснову стварэння цеплавых рухавікоў?

3. У чым заключаецца роля награвальніка, халадзільніка і рабочага цела цеплавога рухавіка?

4. Ці можа эфектыўны ККД цеплавога рухавіка стаць роўным адзінцы, калі трэнне ў частках рухавіка звесці да нуля?

5. Як найбольш эфектыўна павялічыць тэрмічны ККД цеплавога рухавіка?

6. Як вызначаюць эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння для аўтамабільных рухавікоў унутранага згарання?

7*. Ці можна ахаладзіць паветра ў пакоі, калі адкрыць дзверцы працуючага халадзільніка?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка $\eta_t = 20$ %. Вызначце работу, выкананую ім за цыкл, калі колькасць цеплаты, перададзеная халадзільніку, $Q_2 = -1{,}2$ кДж.

Дадзена:
$\eta_t = 0{,}20$
$|Q_2| = 1{,}2$ кДж $= 1{,}2 \cdot 10^3$ Дж

$A_ц$ — ?

Рашэнне. Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка $\eta_t = \frac{A_ц}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$, дзе Q_1 — колькасць цеплаты, атрыманая рабо-

чым целам ад награвальніка. Тады $Q_1 = \frac{|Q_2|}{1-\eta_t}$. Такім чынам, $A_ц = \eta_t Q_1 = \frac{\eta_t |Q_2|}{1-\eta_t}$.

$$A_ц = \frac{0{,}20 \cdot 1{,}2 \cdot 10^3 \text{ Дж}}{0{,}80} = 0{,}30 \text{ кДж}.$$

Адказ: $A = 0{,}30$ кДж.

Прыклад 2. Кожны з чатырох рухавікоў рэактыўнага самалёта на шляху $s = 5{,}0 \cdot 10^3$ км развівае сярэднюю сілу цягі $\langle F \rangle = 0{,}11$ МН. Вызначце аб'ём газы, зрасходаванай на гэтым шляху, калі эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння рухавіка $\eta_э = 24$ %. Шчыльнасць і ўдзельная цеплата згарання газы адпаведна $\rho = 8{,}0 \cdot 10^2 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $q = 4{,}3 \cdot 10^7 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Дадзена:
$s = 5{,}0 \cdot 10^3$ км $= 5{,}0 \cdot 10^6$ м
$\langle F \rangle = 0{,}11$ МН $= 1{,}1 \cdot 10^5$ Н
$\eta_э = 0{,}24$
$\rho = 8{,}0 \cdot 10^2 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
$q = 4{,}3 \cdot 10^7 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

V — ?

Рашэнне. Згодна з азначэннем эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння $\eta_э = \frac{A_{карысн}}{Q_{поўн}}$, дзе $A_{карысн} = 4\langle F \rangle s$ — карысная работа, выкананая ўсімі чатырма рухавікамі самалёта, $Q_{поўн} = q\rho V$ — колькасць цеплаты, якая выдзяляецца пры поўным згаранні газы на шляху s. Тады $\eta_э = \frac{4\langle F \rangle s}{q\rho V}$, адкуль $V = \frac{4\langle F \rangle s}{\eta_э q \rho}$.

$$V = \frac{4 \cdot 1{,}1 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot 5{,}0 \cdot 10^6 \text{ м}}{0{,}24 \cdot 4{,}3 \cdot 10^7 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 8{,}0 \cdot 10^2 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 2{,}7 \cdot 10^2 \text{ м}^3.$$

Адказ: $V = 2{,}7 \cdot 10^2$ м^3.

Практыкаванне 10

1. За адзін цыкл рабочае цела цеплавога рухавіка атрымлівае ад награвальніка колькасць цеплаты $Q_1 = 800$ Дж і перадае халадзільніку колькасць цеплаты $Q_2 = -600$ Дж. Вызначце тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка.

2. Тэмпература награвальніка ідэальнага цеплавога рухавіка $T_1 = 390$ К, а тэмпература яго халадзільніка $T_2 = 290$ К. Вызначце тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння ідэальнага цеплавога рухавіка.

3. Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка $\eta_t = 20$ %. Вызначце колькасць цеплаты, перададзеную рабочаму целу ад награвальніка, калі за цыкл рабочым целам выканана работа $A_ц = 300$ Дж.

4. Ідаэльны цеплавы рухавік за кошт кожнага кіладжоўля энергіі, атрыманай ад награвальніка, за цыкл выконвае работу $A_ц = 250$ Дж. Вызначце тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння ідэальнага цеплавога рухавіка і тэмпературу яго награвальніка, калі тэмпература халадзільніка $T_2 = 300$ К.

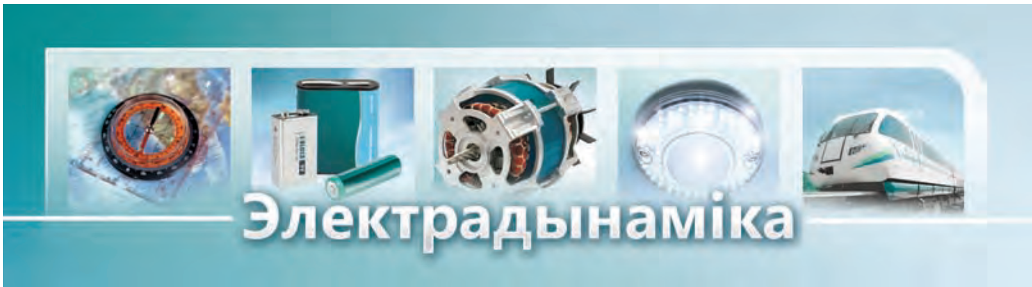
5*. Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння ідэальнага цеплавога рухавіка $\eta_{t1} = 30$ %. Вызначце, на колькі працэнтаў узрасце тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння, калі тэмпературу халадзільніка паменшыць на 25 %, не змяняючы тэмпературу награвальніка.

6*. Награвальнікам ідэальнага цеплавога рухавіка з'яўляецца рэзервуар з кіпячай вадой пры тэмпературы $t_1 = 100$ °C, а халадзільнікам — пасудзіна з лёдам пры тэмпературы $t_2 = 0{,}0$ °C. Вызначце масу расталага за адзін цыкл лёду, калі рабочае цела рухавіка за адзін цыкл выконвае работу $A_ц = 1{,}0$ МДж. Удзельная цеплата плаўлення лёду $\lambda = 3{,}33 \cdot 10^5\ \frac{Дж}{кг}$.

7*. Вынікам работы ідэальнага цеплавога рухавіка быў пад'ём грузу масай $m = 100$ кг на вышыню $h = 20$ м. Адносіна колькасці цеплаты, атрыманай за адзін цыкл ад награвальніка, да тэмпературы награвальніка $\frac{Q_1}{T_1} = 20\ \frac{Дж}{К}$, а рознасць тэмператур награвальніка і халадзільніка $T_1 - T_2 = 125$ К. Вызначце, якая колькасць цыклаў была здзейснена за час пад'ёму грузу.

8. Матацыкл на працягу некаторага прамежку часу рухаецца са скорасцю, модуль якой $v = 30\ \frac{м}{с}$. Пры гэтым расход бензіну на шляху $s = 100$ км складае $V_0 = 4{,}0$ л. Вызначце сярэднюю магутнасць рухавіка матацыкла, калі эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння рухавіка $\eta_э = 25$ %. Шчыльнасць і ўдзельная цеплата згарання бензіну адпаведна $\rho = 7{,}1 \cdot 10^2\ \frac{кг}{м^3}$, $q = 46\ \frac{МДж}{кг}$.

9. Для работы рухавіка электрагенератара, эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння якога $\eta_э = 20{,}0$ %, падрыхтавана цыстэрна дызельнага паліва аб'ёмам $V = 62{,}0$ м^3. Вызначце, на колькі дзён хопіць гэтага паліва пры штодзённай рабоце рухавіка на працягу прамежку часу $t = 7{,}00$ гадз, калі сярэдняя магутнасць рухавіка падчас работы $\langle P \rangle = 150$ кВт. Шчыльнасць і ўдзельная цеплата згарання дызельнага паліва адпаведна $\rho = 800\ \frac{кг}{м^3}$, $q = 42{,}0\ \frac{МДж}{кг}$.



Паводле сучасных уяўленняў асновай усёй разнастайнасці з'яў прыроды з'яўляюцца чатыры фундаментальныя ўзаемадзеянні паміж часціцамі мікрасвету (электрон, пратон і інш.) — моцнае, слабае, электрамагнітнае і гравітацыйнае. Кожны від узаемадзеяння звязаны з пэўнай характарыстыкай часціцы. Напрыклад, гравітацыйнае ўзаемадзеянне залежыць ад мас часціц, электрамагнітнае — ад электрычных зарадаў.

Электрамагнітнае ўзаемадзеянне ляжыць у аснове ўсіх электрычных, магнітных і аптычных з'яў. Гэтым жа ўзаемадзеяннем абумоўлены сілы пругкасці і сілы трэння, вядомыя вам з механікі. Узаемадзеянне атамаў і малекул, якое мы разглядалі пры вывучэнні малекулярна-кінетычнай тэорыі, таксама з'яўляецца электрамагнітным. Электрамагнітнае ўзаемадзеянне вызначае ўласцівасці рэчываў у розных агрэгатных станах і іх хімічныя пераўтварэнні. Паколькі малекулярныя сілы маюць электрамагнітнае паходжанне, практычна ўсе біялагічныя з'явы абумоўлены электрамагнетызмам.

Электрадынаміка — раздзел фізікі, у якім вывучаюць заканамернасці фізічных з'яў, абумоўленых электрычнымі і магнітнымі ўзаемадзеяннямі, матэрыяльным носьбітам якіх з'яўляецца электрамагнітнае поле. Тэрмін «электрадынаміка» ўвёў у фізіку французскі вучоны Андрэ Мары Ампер (1775—1836) у 1822 г.

Пры вывучэнні электрадынамікі вы пазнаёміцеся з законамі ўзаемадзеяння цел (часціц), якія валодаюць электрычным зарадам, асаблівасцямі ўпарадкаванага руху часціц, фізічнымі велічынамі, якія характарызуюць электрычныя і магнітныя з'явы.

У 10 класе вам неабходна вывучыць наступныя раздзелы электрадынамікі: электрастатыка, пастаянны электрычны ток, ток у розных асяроддзях і электрамагнітныя з'явы.

Электрастатыка — раздзел электрадынамікі, у якім вывучаюць уласцівасці, узаемадзеянне і ўмовы раўнавагі *нерухомых* у некаторай інерцыяль-

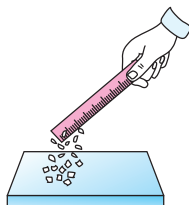
най сістэме адліку электрычна зараджаных цел, размеркаванне зараду на якіх не меняецца з цягам часу, а таксама электрастатычныя палі, што ствараюцца зарадамі такіх цел. Тэрмін «электрастатыка» ўвёў Ампер у 1822 г. Фундаментам электрастатыкі з'яўляюцца эксперыментальныя навуковыя факты, якія адлюстроўваюць паводзіны зараджаных цел пры іх электрычным узаемадзеянні. Ядро электрастатыкі складаюць закон захавання электрычнага зараду, які падчас доследаў устанавіў у 1759 г. пецярбургскі акадэмік Франц Эпінус (1724—1802), і закон узаемадзеяння пунктавых зарадаў у спакоі, які эксперыментальна адкрыў у 1785 г. французскі вучоны Шарль Кулон (1736—1806).

Глава 3

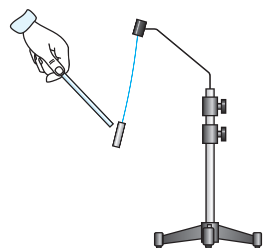
ЭЛЕКТРАСТАТЫКА

§ 13. Электрычны зарад. Закон захавання электрычнага зараду

На ўроках фізікі ў 8 класе падчас правядзення доследаў вы назіралі прыцяжэнне крошак пенапласту, невялікіх кавалачкаў паперы (рыс. 76), лёгкай станіёлевай гільзы (рыс. 77) да пацёртай аб сухую паперу пластмасавай лінейкі або шкляной палачкі. Ва ўсіх пералічаных выпадках мела месца з'ява электрызацыі цел. Яна заключаецца ва ўзнікненні супрацьлеглых па знаку электрычных зарадаў, модулі якіх роўныя, на першапачаткова электрычна нейтральных целах. А што азначае, што цела або часціца мае электрычны зарад? Як узаемадзейнічаюць электрычна зараджаныя целы?



Рыс. 76



Рыс. 77

Электрычны зарад. Электрычны зарад часціцы з'яўляецца крыніцай электрамагнітнага поля, звязанага з матэрыяльным носьбітам. Электрычны зарад, або колькасць электрычнасці (абазначаюць літарай q або Q), — фізічная скалярная велічыня, якая характарызуе інтэнсіўнасць электрамагнітнага ўзаемадзеяння цел (часціц). Электрычны зарад мае наступныя фундаментальныя ўласцівасці:

1) электрычны зарад існуе ў двух відах, якія называюць дадатным і адмоўным зарадам (існаванне двух відаў зараду ўстанавіў Шарль Дзюфэ (1698—1739) у 1733 г., а ў 1747 г. Бенджамін Франклін (1706—1790) прыпісаў ім знакі «+» і «−»);

2) у любой электрычна ізаляванай сістэме алгебраічная сума зарадаў цел (часціц) не мяняецца;

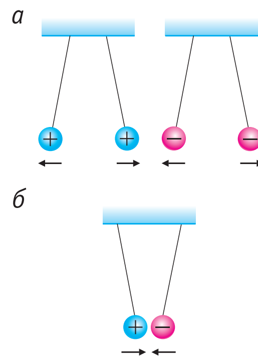
3) значэнне электрычнага зараду цела (часціцы) не залежыць ад выбару сістэмы адліку, а значыць, не залежыць ад таго, рухаецца яно (яна) ці знаходзіцца ў спакоі;

4) электрычны зарад цела (часціцы) не залежыць ні ад яго (яе) механічнага стану, ні ад якіх-небудзь дзеючых на яго (яе) сіл.

Носьбітам зараду можа быць як элементарная часціца, так і макраскапічнае цела.

! **У адным молі рэчыва (~$6 \cdot 10^{23}$ малекул) зараджанага цела звычайна змяшчаецца адносна невялікая колькасць электронаў (да ~$1 \cdot 10^{10}$), залішніх ці адсутных у параўнанні з колькасцю пратонаў. Гэта выклікае змяненне масы зараджанага цела не больш чым на $9 \cdot 10^{-31}$ кг $\cdot\ 1 \cdot 10^{10}$ = $9 \cdot 10^{-21}$ кг у параўнанні з масай нейтральнага цела. Такое змяненне масы цела, безумоўна, нельга не улічваць.**

Як вы ведаеце, электрычнае ўзаемадзеянне праяўляецца ў тым, што аднайменна зараджаныя целы (часціцы) адштурхваюць адно аднаго (рыс. 78, *а*), а рознаіменна зараджаныя — прыцягваюць адно аднаго (рыс. 78, *б*). Калі ў *электрычна нейтральным целе зарады размеркаваны нераўнамерна* і з прычыны гэтага ўзніклі супрацьлегла зараджаныя часткі, то такія целы таксама электрычна ўзаемадзейнічаюць (гл. рыс. 76 і 77).



Рыс. 78

Зарады розных цел (часціц) могуць арозніваць не толькі знакам, але і лікавым значэннем.

За адзінку электрычнага зараду ў СІ прыняты кулон (Кл). Гэта адзінка названа ў гонар Ш. Кулона. 1 Кл — электрычны зарад, які праходзіць праз папярочнае сячэнне праваднікa за прамежак часу 1 с пры сіле пастаяннага току 1 А.

! **Адзін кулон — вельмі вялікая адзінка зараду. Разлікі паказваюць, што дыяметр аддаленага ад астатніх цел металічнага шара, які знаходзіцца ў сухім паветры, павінен быць роўны прыблізна 110 м, каб на ім мог знаходзіцца залішні зарад 1 Кл. Разам з тым у час уключэння аўтамабільных фар сіла току ў ланцугу прыблізна 10 А, г. зн. штосекундна праз папярочнае сячэнне праваднікоў, далучаных да фар, праходзіць зарад прыблізна 10 Кл.**

На мяжы XIX і XX стагоддзяў вучоныя эксперыментальна вызначылі, што ў прыродзе існуе электрычны зарад, модуль якога мінімальны, ён носіць назву

элементарны. Ядры ўсіх атамаў змяшчаюць пратоны, якія з'яўляюцца носьбітамі дадатнага элементарнага зараду, а самі атамы змяшчаюць электроны, якія з'яўляюцца носьбітамі адмоўнага элементарнага зараду. Роўнасць модуляў зарадаў электрона і пратона ўстаноўлена з дакладнасцю ~10^{-20}. Модуль элементарнага электрычнага зараду $e = 1{,}6022 \cdot 10^{-19}$ Кл. Звычайна абмяжоўваюцца дзвюма значнымі лічбамі: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электроны, пратоны і нейтроны ўваходзяць у склад усіх цел, бо з іх складаюцца атамы і малекулы любога рэчыва. У электрычна нейтральным целе алгебраічная сума зарадаў усіх часціц роўная нулю. Калі якім-небудзь чынам стварыць у такім целе лішак зарадаў аднаго знака, яно акажацца зараджаным. Зарад q цела ствараецца сукупнасцю элементарных зарадаў і заўсёды кратны элементарнаму зараду e (электрычны зарад дыскрэтны):

$$q = e\,(N_p - N_e),$$

дзе N_p і N_e — колькасці пратонаў і электронаў у дадзеным целе.

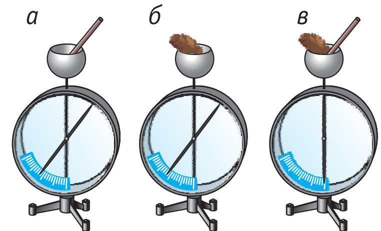
Напрыклад, цела, зарад якога $q = 7e$, адрозніваецца ад нейтральнага цела стратай сямі электронаў.

Закон захавання электрычнага зараду. Модулі супрацьлеглых па знаку зарадаў, якія ўзніклі ў выніку электрызацыі на целах, што знаходзіліся ў кантакце, роўныя. У гэтым можна пераканацца падчас доследу. Возьмем эбанітавую палачку і кавалачак футра. Пры трэнні адно аб адно целы электрызуюцца. Пакладзём па чарзе ўнутр металічнай сферы, што замацавана на стрыжні электрометра, эбанітавую палачку (рыс. 79, *а*) і кавалачак футра (рыс. 79, *б*). Стрэлка электрометра адхіліцца, прычым як у першым, так і ў другім выпадках на аднолькавы вугал. Калі адначасова апусціць унутр сферы эбанітавую палачку і кавалачак футра (рыс. 79, *в*), стрэлка электрометра застанецца на месцы. Значыць, модулі зарадаў абодвух цел роўныя, а іх знакі супрацьлеглыя.

Вынікі шматлікіх эксперыментаў дазволілі сфармуляваць сцверджанне, якое з'яўляецца фундаментальным законам прыроды — *законам захавання электрычнага зараду*: **у электрычна ізаляванай сістэме падчас любых узаемадзеянняў алгебраічная сума электрычных зарадаў застаецца пастаяннай**:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_n = \text{const},$$

дзе n — колькасць зарадаў у сістэме. Сістэму цел (часціц) называюць *электрычна ізаляванай*, калі паміж ёй і знешнімі целамі няма абмену электрычна зараджанымі часціцамі.



Рыс. 79

1. Электрычны зарад — фізічная скалярная велічыня, якая характарызуе інтэнсіўнасць электрамагнітнага ўзаемадзеяння цел (часціц). Электрычны зарад існуе ў двух відах: дадатны і адмоўны. Аднайменныя зарады адштурхваюцца, а рознаіменныя — прыцягваюцца.

2. Існуе зарад, модуль якога мінімальны, ён называецца элементарным:

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}.$$

3. Электрычны зарад дыскрэтны, г. зн. электрычны зарад любой часціцы або цела з'яўляецца кратным элементарнаму электрычнаму зараду.

4. Закон захавання электрычнага зараду: у электрычна ізаляванай сістэме падчас любых узаемадзеянняў алгебраічная сума электрычных зарадаў застаецца пастаяннай:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \ \dots\ + q_n = \text{const}.$$

5. Значэнне электрычнага зараду не залежыць ад таго, рухаецца ён або знаходзіцца ў спакоі.

1. Як растлумачыць электрызацыю цел у час судакранання? Чаму пры электрызацыі зараджаюцца абодва целы?

2. Што характарызуе электрычны зарад?

3. Ці можа існаваць электрычны зарад без матэрыяльнага носьбіта?

4. Якія два віды электрычных зарадаў існуюць у прыродзе? Як узаемадзейнічаюць аднайменна зараджаныя часціцы? рознаіменна зараджаныя?

5. Які зарад называюць элементарным?

6. У чым праяўляецца ўласцівасць дыскрэтнасці электрычнага зараду?

7. Сфармулюйце закон захавання электрычнага зараду. Якія межы прымяняльнасці гэтага закона?

Практыкаванне 11

1. Ці можна у час электрызацыі шкляной палачкі аб шоўк надаць ёй зарад $q = 4{,}8 \cdot 10^{-21}$ Кл?

2. Металічны шарык мае $N = 5{,}0 \cdot 10^5$ залішніх электронаў. Вызначце, чаму роўны яго зарад.

3. Вызначце сумарны зарад усіх пратонаў, якія знаходзяцца ў вадзе аб'ёмам $V = 9{,}0$ см^3.

4. Падчас слізгання шклянога бруска з нахіленай плоскасці адбываецца яго электрызацыя. Як гэта ўплывае на канчатковую скорасць бруска?

5. Два аднолькавыя металічныя шары, электрычныя зарады якіх $-q$ і $4q$, прывялі ў судакрананне. Вызначце, чаму роўны зарад кожнага шара пасля судакранання.

6. Металічны шар, зарад якога $q = -4{,}8 \cdot 10^{-11}$ Кл, прывялі ў судакрананне з такім жа незараджаным шарам. Які зарад атрымаў другі шар? Колькі залішніх электронаў засталося на першым шары?

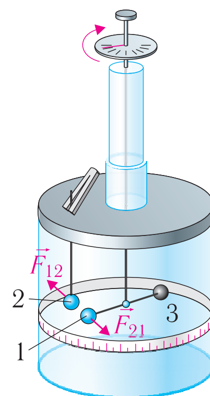
7*. Дадатны зарад меднага шара $q = 25$ нКл. Якую частку сваіх валентных электронаў страціў шар, калі яго маса $m = 0{,}10$ кг? Валентнасць медзі $n = 1$.

§ 14. Узаемадзеянне пунктавых зарадаў. Закон Кулона

Абмяркоўваючы электрызацыю як электрастатычную з'яву, мы не ставілі пытанне: «А як вызначыць сілу, з якой адно зараджанае цела прыцягвае або адштурхвае другое?» Адказ на гэта пытанне быў знойдзены ў канцы XVIII стагоддзя незалежна адзін ад аднаго двума вучонымі: Г. Кавендзішам у 1774 г. і Ш. Кулонам у 1785 г. Аднак сучаснікам сталі вядомыя толькі вынікі доследаў Кулона.

Закон Кулона. Вы ўжо сустракаліся з фізічнымі мадэлямі, калі вывучалі механіку (матэрыяльны пункт) і малекулярную фізіку (ідэальны газ). У электрастатыцы падчас вывучэння ўзаемадзеяння электрычна зараджаных цел эфектыўнай аказваецца мадэль «пунктавы зарад». *Пунктавы зарад* — зарад такога зараджанага цела, памеры якога значна меншыя за адлегласць ад гэтага цела да пункта назірання і да іншых цел (г. зн. памеры зараджанага цела ва ўмовах дадзенай задачы можна не прымаць пад увагу).

Кулон першы апублікаваў вынікі сваіх даследаванняў па ўзаемадзеянні нерухомых пунктавых зарадаў. Ён шляхам доследаў устанавіў залежнасць сіл электрычнага ўзаемадзеяння цел ад модуляў зарадаў гэтых цел і адлегласці паміж імі. Атрыманая ім суадносіна з'яўляецца адным з асноўных законаў электрастатыкі.



Рыс. 80

У сваіх доследах Кулон выкарыстоўваў спецыяльны прыбор — круцільную вагу (рыс. 80). Круцільная вага ўяўляе сабой два шкляныя цыліндры, унутры якіх на тонкай сярэбранай нітцы падвешаны лёгкі неправодны каромысел. На адным канцы каромысла замацаваны праводны шар *1*, а на другім — папяровая процівага *3*. Шар *1* можна зараджаць з дапамогай такога ж праводнага

шара *2*, што знаходзіцца на ізалюючым стрыжні, які замацаваны на накрыўцы ніжняга цыліндра. У час судакранання шара *1* з зараджаным шарам *2* зарад размяркоўваецца паміж імі пароўну, і шары адштурхваюцца. Па вугле закручвання ніткі, які адлічваецца па шкале, можна вызначыць сілу, з якой зарад шара *2* дзейнічае на зарад шара *1*. Зрабіўшы вялікую колькасць доследаў, Кулон вызначыў, што модулі сіл узаемадзеяння двух зараджаных шароў $\left|\vec{F}_{21}\right| = \left|\vec{F}_{12}\right| = F$ адваротна прапарцыянальныя квадрату адлегласці паміж імі: $F \sim \frac{1}{r^2}$.

Разражаючы шар *2* дотыкам рукі, а потым дакранаючыся ім да ўжо зараджанага шара *1*, Кулон змог атрымаць на ім зарады, модуль якіх у 2, 4, 8 і г. д. разоў меншы за першапачатковы. Ён высветліў, што пры нязменнай адлегласці модуль сіл узаемадзеяння двух нерухомых невялікіх зараджаных цел прама прапарцыянальны здабытку модуляў электрычных зарадаў кожнага з іх: $F \sim |q_1| \cdot |q_2|$.

Абагульніўшы эксперыментальныя даныя, Кулон сфармуляваў закон, які атрымаў яго імя.

Модулі сіл узаемадзеяння двух нерухомых пунктавых зараджаных цел у вакууме прама прапарцыянальныя здабытку модуляў зарадаў гэтых цел, адваротна прапарцыянальныя квадрату адлегласці паміж імі, а самі сілы накіраваны ўздоўж прамой, што злучае гэтыя целы, з'яўляючыся сіламі адштурхвання для аднайменных зарадаў і сіламі прыцяжэння для рознаіменных.

$$\boldsymbol{F = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}}, \tag{14.1}$$

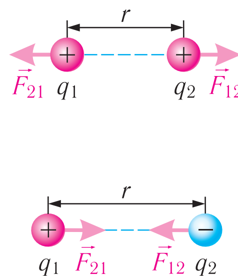
дзе k — каэфіцыент прапарцыянальнасці, які залежыць ад выбару адзінак фізічных велічынь, $|q_1|$ і $|q_2|$ — модулі пунктавых зарадаў, r — адлегласць паміж імі.

Сілы ўзаемадзеяння нерухомых пунктавых зарадаў называюць *кулонаўскімі сіламі*. У адпаведнасці з трэцім законам Ньютана гэтыя сілы супрацьлегла накіраваны $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, а іх модулі роўныя (рыс. 81).

У СІ каэфіцыент прапарцыянальнасці

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 8{,}99 \cdot 10^9 \ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2},$$

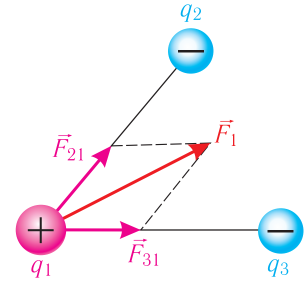
дзе $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ — *электрычная пастаянная.*



Рыс. 81

Шляхам доследаў вызначылі, што сілы ўзаемадзеяння двух пунктавых зарадаў не змяняюцца пры з'яўленні трэцяга пунктавага зараду або любой колькасці пунктавых зарадаў. У гэтым выпадку сілы ўздзеяння $\vec{F}_{21}, \vec{F}_{31}, ..., \vec{F}_{n1}$ кожнага з зарадаў $q_2, q_3, ..., q_n$ на зарад q_1 вызначаюць па законе Кулона. Выніковая сіла з'яўляецца вектарнай сумай сіл, з якімі кожны з гэтых зарадаў паасобна ўздзейнічае на зарад q_1 (прынцып суперпазіцыі).

Выкарыстаўшы прынцып суперпазіцыі і закон Кулона, можна апісаць электрастатычнае ўзаемадзеянне любой сістэмы зарадаў. На рысунку 82 паказаны тры пунктавыя электрычныя зарады, якія ўзаемадзейнічаюць паміж сабой: $q_1 > 0$, $q_2 < 0$, $q_3 < 0$. Раўнадзейнай сіл, што дзейнічаюць на зарад q_1 з боку зарадаў q_2 і q_3, з'яўляецца сіла $\vec{F}_1$, якая роўная вектарнай суме сіл $\vec{F}_{21}$ і $\vec{F}_{31}$: $\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31}$. Сілы $\vec{F}_{21}$ і $\vec{F}_{31}$ уздзеяння зарадаў q_2 і q_3 на зарад q_1 вызначаюць па законе Кулона.



Рыс. 82

Закон Кулона, які апісвае электрастатычнае ўзаемадзеянне, фармальна падобны на закон сусветнага прыцягнення Ньютана, што вызначае сілы гравітацыйнага ўзаемадзеяння двух цел:

$$\left|\vec{F}_{12}\right| = \left|\vec{F}_{21}\right| = F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

У абодвух выпадках модуль сіл узаемадзеяння:

— адваротна прапарцыянальны квадрату адлегласці паміж матэрыяльнымі пунктамі;

— прама прапарцыянальны велічыням, якія характарызуюць тыя ўласцівасці цел (матэрыяльных пунктаў), якія вызначаюць узаемадзеянні, — масам у адным выпадку і электрычным зарадам — у другім.

Для вымярэння сіл электрычнага і гравітацыйнага ўзаемадзеянняў вучоныя выкарысталі падобныя па канструкцыі эксперыментальныя ўстаноўкі.

Аднак паміж сіламі гравітацыйнага і электрастатычнага ўзаемадзеянняў існуе істотнае адрозненне. Ньютанаўскія сілы прыцягнення — гэта заўсёды сілы прыцяжэння. Кулонаўскія ж сілы ўзаемадзеяння зарадаў могуць быць як сіламі прыцяжэння (паміж разнаіменнымі зарадамі), так і сіламі адштурхвання (паміж аднайменнымі зарадамі).

Закон Кулона ў выглядзе (14.1) праўдзівы не толькі для пунктавых зарадаў, але і для зараджаных цел сферычнай формы, зарады якіх размеркаваны

раўнамерна па ўсім аб'ёме або па паверхні гэтых цел (пры гэтым r — адлегласць паміж цэнтрамі сферычных цел).

Як паказваюць доследы, узаемадзеянне электрычна зараджаных цел у вакууме практычна не адрозніваецца ад іх узаемадзеяння ў паветры. Таму формулу (14.1) выкарыстоўваюць, апісваючы ўзаемадзеянне зараджаных цел як у вакууме, так і ў паветры. Калі зараджанае цела знаходзіцца ў вадзе, газе, алеі або якім-небудзь іншым неправодным асяроддзі, то модуль сіл узаемадзеяння будзе меншы, чым у вакууме.

Эксперыментальныя факты сведчаць, што ўздзеянне нерухомага ў дадзенай інерцыяльнай сістэме адліку пунктавага зараду на пунктавы зарад, які рухаецца, можа апісваць законам Кулона з прымальнай дакладнасцю. Так, вынікі тэарэтычнага апісання рассеяння α-часціц на ядрах атамаў золата ў доследах Рэзерфорда з дапамогай мадэлі пунктавага зараду, на які дзейнічае кулонаўская сіла з боку нерухомага ядра, супадаюць з эксперыментальнымі данымі ў межах дакладнасці апошніх ($\delta \sim 3 \cdot 10^{-2}$). Модуль скорасці руху α-часціц адносна ядра атама золата $v \approx 1{,}4 \cdot 10^7 \ \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 0{,}05c$, дзе c — скорасць распаўсюджання святла ў вакууме.

Два і больш зарадаў, якія *рухаюцца* ў дадзенай інерцыяльнай сістэме, *не могуць* характарызавацца *толькі* кулонаўскім узаемадзеяннем, паколькі кожны з іх стварае ў навакольным асяроддзі магнітнае поле, якое ўздзейнічае магнітнай сілай на іншыя зарады, што рухаюцца ў ім.

1. Пунктавы зарад — зарад такога зараджанага цела, памеры якога значна меншыя за адлегласць ад гэтага цела да пункта назірання і да іншых цел (г. зн. памеры зараджанага цела ва ўмовах дадзенай задачы можна не прымаць пад увагу).

2. Закон Кулона: модулі сіл узаемадзеяння двух нерухомых пунктавых зараджаных цел у вакууме прама прапарцыянальныя здабытку модуляў зарадаў гэтых цел, адваротна прапарцыянальныя квадрату адлегласці паміж імі, а самі сілы накіраваны ўздоўж прамой, што злучае гэтыя целы, з'яўляючыся сіламі адштурхвання для аднайменных зарадаў і сіламі прыцяжэння для рознаіменных:

$$F = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}.$$

3. Сілы ўзаемадзеяння двух пунктавых зарадаў не змяняюцца пры з'яўленні іншых пунктавых зарадаў. Сілы ўздзеяння $\vec{F}_{21}$, $\vec{F}_{31}$, ..., $\vec{F}_{n1}$ кожнага з зарадаў q_2, q_3, ..., q_n на зарад q_1 вызначаюць па законе Кулона,

а выніковую сілу, што дзейнічае на зарад q_1, знаходзяць як вектарную суму сіл, з якімі кожны з гэтых зарадаў паасобна ўздзейнічае на зарад q_1 (прынцып суперпазіцыі).

4. Закон Кулона праўдзівы для нерухомых пунктавых зарадаў і сферычных цел з раўнамерным размеркаваннем зараду па паверхні або аб'ёме.

?

1. Да якога віду ўзаемадзеянняў адносяць узаемадзеянне нерухомых электрычных зарадаў (зараджаных цел)?

2. Растлумачце, чаму гравітацыйнае і электрастатычнае ўзаемадзеянні не заўсёды прыкметныя. Прывядзіце прыклады, калі такія ўзаемадзеянні назіраюцца, і растлумачце, чаму.

3. Зарады якіх зараджаных цел можна лічыць пунктавымі?

4. Апішыце эксперыменты Кулона па даследванні ўзаемадзеяння электрычных зарадаў.

5. Сфармулюйце закон Кулона. Якія межы прымяняльнасці закона Кулона?

6. Чаму роўны ў СІ каэфіцыент k? Які яго фізічны сэнс?

7. Матэматычны запіс закона Кулона нагадвае закон сусветнага прыцягнення. У чым адрозненне гэтых законаў? Параўнайце фізічныя паняцці «маса» і «электрычны зарад».

8. У чым сутнасць прынцыпу суперпазіцыі для электрычнага ўзаемадзеяння пунктавых зарадаў?

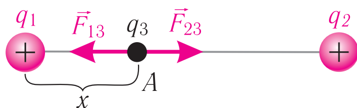
Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Дзве пацеркі, электрычныя зарады якіх $q_1 = 40$ нКл і $q_2 = 90$ нКл, замацаваны на неправодным стрыжні на адлегласці $r = 40$ см адна ад адной. Вызначце: а) дзе трэба размясціць трэцюю пацерку, якая мае зарад q_3, каб яна была ў раўнавазе; б) якім павінен быць зарад q_3 трэцяй пацеркі, каб сіла электрастатычнага ўзаемадзеяння кожнай з трох пацерак з іншымі дзвюма была роўная нулю.

Дадзена:
$q_1 = 40$ нКл $= 4{,}0 \cdot 10^{-8}$ Кл
$q_2 = 90$ нКл $= 9{,}0 \cdot 10^{-8}$ Кл
$r = 40$ см $= 0{,}40$ м

x — ? q_3 — ?

Рашэнне. а) Трэцяя пацерка, якая мае зарад q_3, будзе знаходзіцца ў раўнавазе, калі яе змясціць у некаторы пункт A паміж зарадамі q_1 і q_2 на прамой, якая злучае гэтыя зарады (рыс. 83). Няхай зарад $q_3 < 0$. Тады з боку зарадаў q_1 і q_2 на зарад q_3 будуць дзейнічаць супрацьлегла



Рыс. 83

Рыс. 84

накіраваныя кулонаўскія сілы прыцяжэння $\vec{F}_{13}$ і $\vec{F}_{23}$. Згодна з другім законам Ньютана гэтая пацерка будзе знаходзіцца ў спакоі, калі модулі сіл F_{13} і F_{23} роўныя. Тады, прыняўшы адлегласць ад зараду q_1 да пункта A роўнай x, запішам: $k\frac{q_1|q_3|}{x^2} = k\frac{q_2|q_3|}{(r-x)^2}$. Паколькі k і q_3 не роўныя нулю, то гэты выраз можна скараціць: $\frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{(r-x)^2}$. Здабудзем з абедзвюх частак роўнасці квадратны корань ($x > 0$, $r - x > 0$): $\frac{\sqrt{q_1}}{x} = \frac{\sqrt{q_2}}{(r-x)}$. Адсюль $x = \frac{\sqrt{q_1}\cdot r}{\sqrt{q_1}+\sqrt{q_2}}$.

$$x = \frac{\sqrt{4{,}0\cdot 10^{-8}\text{ Кл}}\cdot 0{,}40\text{ м}}{\sqrt{4{,}0\cdot 10^{-8}\text{ Кл}}+\sqrt{9{,}0\cdot 10^{-8}\text{ Кл}}} = 0{,}16\text{ м}.$$

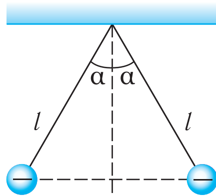
Такое ж значэнне x мы атрымаем, калі прымем, што зарад q_3 пацеркі дадатны (праверце гэта самастойна).

б) Сіла электрастатычнага ўзаемадзеяння кожнай з трох пацерак з іншымі дзвюма роўная нулю, калі, напрыклад, трэцяя пацерка прыцягвае другую з сілай, модуль $|\vec{F}_{32}|$ якой роўны модулю сілы $|\vec{F}_{12}|$, з якой яе адштурхвае першая пацерка (рыс. 84). Пры гэтым зарад трэцяй пацеркі павінен быць адмоўным, г. зн. $q_3 < 0$. Тады $k\frac{q_1 q_2}{r^2} = k\frac{q_2|q_3|}{(r-x)^2}$. Адкуль $|q_3| = \frac{(r-x)^2}{r^2}q_1$.

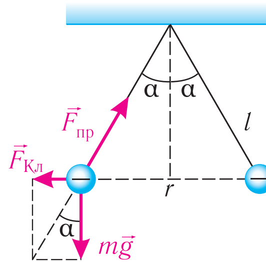
$$|q_3| = \frac{(0{,}24\text{ м})^2}{(0{,}40\text{ м})^2}\cdot 4{,}0\cdot 10^{-8}\text{ Кл} = 1{,}4\cdot 10^{-8}\text{ Кл} = 14\text{ нКл}.$$

Адказ: $x = 16$ см, адлегласць да пацеркі з зарадам q_3 не залежыць ад значэння і знака яе зараду; калі зарад пацеркі $q_3 = -14$ нКл, то сіла электрастатычнага ўзаемадзеяння кожнай з трох пацерак з іншымі дзвюма роўная нулю.

Прыклад 2. Два аднолькавыя маленькія праводныя шарыкі масай $m = 20$ мг кожны падвешаны ў паветры на лёгкіх нерасцяжных нітках даўжынёй $l = 0{,}20$ м, замацаваных у адным пункце падвеса. Адзін з шарыкаў адвялі ў бок, надалі яму зарад $q < 0$ і адпусцілі. Пасля сутыкнення шарыкі разышліся так, што вугал паміж ніткамі склаў $2\alpha = 60°$ (рыс. 85). Вызначце значэнне зараду, які быў нададзены першаму шарыку, а таксама колькасць залішніх электронаў на кожным з шарыкаў пасля іх сутыкнення.



Рыс. 85



Рыс. 86

Дадзена:
$m = 20 \text{ мг} = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ кг
$l = 0{,}20$ м
$2\alpha = 60°$

q — ?
N — ?

Рашэнне. Выкарыстаем закон захавання электрычнага зараду. Падчас сутыкнення двух аднолькавых праводных шарыкаў нададзены аднаму з іх зарад падзяліўся пароўну і на кожным шарыку аказаўся залішні адмоўны зарад $q_1 = q_2 = \frac{q}{2}$. На кожны шарык дзейнічае сіла цяжару $\vec{F}_ц = m\vec{g}$, сіла электрастатычнага ўзаемадзеяння $\vec{F}_{Кл}$ і сіла пругкасці ніткі $\vec{F}_{пр}$ (рыс. 86).

Пасля сутыкнення шарыкі разышліся, і ўсталявалася раўнавага. Вектарная сума сіл, якія дзейнічаюць на кожны шарык, стала роўная нулю: $m\vec{g} + \vec{F}_{Кл} + \vec{F}_{пр} = \vec{0}$. Модуль сілы электрастатычнага ўзаемадзеяння $F_{Кл} = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = \frac{kq^2}{4r^2}$. Паколькі шарыкі разышліся сіметрычна адносна вертыкалі, што праходзіць праз пункт падвеса нітак, то $\frac{r}{2l} = \sin\alpha$ (гл. рыс. 86). Значыць, $F_{Кл} = \frac{kq^2}{16l^2 \sin^2\alpha}$. Паколькі $\frac{F_{Кл}}{mg} = \operatorname{tg}\alpha$ (гл. рыс. 86),

то $\frac{kq^2}{16l^2\sin^2\alpha} = mg\,\mathrm{tg}\,\alpha$, адкуль $|q| = 4l\sin\alpha\sqrt{\frac{mg\,\mathrm{tg}\,\alpha}{k}}$.

Прымем $k = 9{,}0\cdot10^9\ \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$.

$$|q| = 4\cdot0{,}20\ \text{м}\cdot0{,}50\sqrt{\frac{2{,}0\cdot10^{-5}\ \text{кг}\cdot9{,}8\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\cdot0{,}58}{9{,}0\cdot10^9\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}}} = 4{,}5\cdot10^{-8}\ \text{Кл} = 45\ \text{нКл}.$$

Колькасць залішніх электронаў на кожным шарыку $N = \frac{|q|}{2e}$.

$$N = \frac{4{,}5\cdot10^{-8}\ \text{Кл}}{2\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\ \text{Кл}} = 1{,}4\cdot10^{11}.$$

Адказ: $q = -45$ нКл, $N = 1{,}4\cdot10^{11}$.

Практыкаванне 12

1. Вызначце модуль сіл узаемадзеяння двух аднолькавых нерухомых пунктавых зарадаў $q_1 = q_2 = 9{,}0$ нКл, якія знаходзяцца на адлегласці $r = 0{,}30$ м адзін ад аднаго ў вакууме.

2. Вызначце, у колькі разоў трэба павялічыць адлегласць паміж двума нерухомымі пунктавымі зарадамі, каб модуль сіл узаемадзеяння застаўся ранейшым пры павелічэнні лікавага значэння аднаго з зарадаў у чатыры разы.

3. Два аднолькавыя маленькія праводныя шарыкі, зарады якіх адрозніваюцца ў два разы, знаходзяцца на адлегласці $r = 50$ см. Вызначце адлегласць, на якую неабходна развесці шарыкі пасля сутыкнення, каб модуль сіл узаемадзеяння застаўся ранейшым.

4. На двух аднолькавых маленькіх шарыках масай $m = 40$ г кожны знаходзяцца аднайменныя зарады, модулі якіх роўныя. Адлегласць паміж шарыкамі значна перавышае іх памеры. Вызначце модулі зарадаў шарыкаў, калі кулонаўская сіла іх адштурхвання ўраўнаважвае сілу гравітацыйнага прыцяжэння гэтых шарыкаў.

5. Пунктавыя зарады $q_1 = 50$ нКл і $q_2 = 80$ нКл замацаваны на адлегласці $r = 2{,}0$ м адзін ад аднаго ў вакууме. На сярэдзіне адрэзка прамой, што злучае зарады, знаходзіцца трэці пунктавы зарад $q_3 = 1{,}0$ нКл. Вызначце модуль выніковай электрастатычнай сілы, якая дзейнічае на трэці зарад. Куды накіравана гэтая сіла?

6. Невялікі шарык, зарад якога $q_1 = 20$ нКл і маса $m = 60$ мг, падвешаны ў паветры на шаўковай нітцы. Пасля таго як на вертыкалі, што праходзіць праз цэнтр шарыка, на адлегласці $r = 15$ см ніжэй за яго размясцілі другі маленькі шарык, зараджаны рознаіменна, модуль сілы пругкасці ніткі павялічыўся ў два разы. Вызначце зарад другога шарыка.

7. Два маленькія шарыкі масай $m = 40$ г кожны падвешаны ў адным пункце на нітках даўжынёй $l = 20$ см. Вызначце, якія аднолькавыя зарады трэба надаць шарыкам, каб ніткі разышліся на вугал $\alpha = 60°$.

8*. Тры першапачаткова замацаваныя аднолькавыя пунктавыя зарады $q_1 = q_2 = q_3 = q_0 = 1{,}0$ нКл размешчаны ў вяршынях роўнастаронняга трохвугольніка. Вызначце, які пунктавы зарад трэба змясціць у цэнтр трохвугольніка, каб уся сістэма знаходзілася ў раўнавазе пасля вызвалення першапачаткова замацаваных зарадаў. Устойлівай або няўстойлівай з'яўляецца дадзеная раўнавага?

§ 15. Электрастатычнае поле. Напружанасць і лініі напружанасці электрастатычных палёў

Зараджаныя целы і часціцы, якія коратка называюць зарадамі, узаемадзейнічаюць адно з адным. Гэта пацвярджаюць шматлікія доследы, а закон Кулона дазваляе вызначыць сілы ўзаемадзеяння нерухомых пунктавых зарадаў. Але што з'яўляецца прычынай такога ўзаемадзеяння, які яго механізм?

Электрастатычнае поле. Першым, хто здагадаўся, што «целы дзейнічаюць адно на адно на адлегласці шляхам прывядзення навакольнага асяроддзя ў стан напружання», быў выдатны англійскі вучоны Майкл Фарадэй (1791—1867). Абагульніўшы вынікі ўласных даследаванняў, праведзеных з 1832 г. па 1852 г., Фарадэй увёў у фізіку новае паняцце — поле. Матэматычную завершанасць ідэі Фарадэя пра змену стану прасторы паблізу зараджаных цел (часціц) і ўзнікненне новай сутнасці, якую потым назвалі электрамагнітным полем, надаў яго геніяльны суайчыннік і пераемнік Джэймс Клерк Максвел (1831—1879).

Электрычны зарад, які стварае ў навакольнай прасторы электрычнае поле, называюць крыніцай поля і часта абазначаюць сімвалам Q. Электрычнае поле аказвае сілавое дзеянне на любы іншы зарад q, змешчаны ў яго.

Самая істотная асаблівасць электрычнага поля — яго матэрыяльнасць, г. зн. *электрычнае поле — від матэрыі*. У рэальнасці існавання электрыч-

нага поля можна пераканацца па яго праявах: поле, створанае зарадам, дзейнічае з пэўнай сілай на іншыя зарады, якія ў яго ўносяць.

Поле, якое ствараецца нерухомымі адносна выкарыстоўваемай інерцыяльнай сістэмы адліку электрычнымі зарадамі, называюць *электрастатычным полем*.

Каб даследаваць электрастатычнае поле, створанае зарадам Q, змесцім у гэта поле зарад q_0, які называюць пробным. Пад *пробным зарадам* разумеюць зарад, модуль якога дастаткова малы $(|q_0| << |Q|)$ і ўласнае поле не мяняе істотна размеркавання астатніх зарадаў, якія ствараюць дадзенае поле. Пробны зарад павінен быць пунктавым, каб можна было даследаваць поле ў малых частках прасторы. Пробны зарад можа быць як дадатны, так і адмоўны.

Адзначым, што ўласцівасць электрычнага поля, абумоўленая прысутнасцю цела з зарадам-крыніцай поля Q, уздзейнічаць некаторай сілай праяўляецца не толькі ў пункце, у якім знаходзіцца пробны зарад q_0. Гэту ўласцівасць маюць усе пункты поля, створанага зарадам Q.

Выкарыстоўваючы пробны зарад q_0, можна колькасна ахарактарызаваць электрастатычнае поле, створанае любым зараджаным целам, паказаўшы модуль і напрамак сілы, якая дзейнічае на гэты зарад q_0. Зручна карыстацца такой характарыстыкай электрастатычнага поля, якая не залежыць ад лікавага значэння пробнага зараду. Ёю з'яўляецца напружанасць.

Напружанасць электрастатычнага поля. Калі ў адвольна выбраны пункт A электрастатычнага поля, створанага зарадам Q, унесці пробны зарад q_{01}, то поле падзейнічае на яго з пэўнай сілай $\vec{F}_1$. Змесцім па чарзе ў гэты ж пункт поля іншыя пробныя зарады q_{02}, q_{03}, q_{04} ..., значэнні якіх у 2, 3, 4 і г. д. разоў адрозніваюцца ад значэння зараду q_{01}. Дослед паказвае, што модулі сіл F_1, F_2, F_3, F_4 ..., якія дзейнічаюць з боку электрастатычнага поля, створанага зарадам Q, на пробныя зарады q_{01}, q_{02}, q_{03}, q_{04} ..., прама прапарцыянальныя значэнням гэтых зарадаў.

Такім чынам, адносіна сілы, якая дзейнічае на змешчаны ў некаторы пункт поля пробны зарад, да значэння гэтага зараду для дадзенага пункта поля застаецца нязменнай. Гэта адносіна з'яўляецца сілавой характарыстыкай электрастатычнага поля, якая атрымала назву *напружанасць*.

Напружанасцю $\vec{E}$ электрастатычнага поля ў любым яго пункце называюць фізічную вектарную велічыню, якая характарызуе сілавое ўздзеянне поля на ўнесеныя ў яго зарады і роўная адносіне сілы $\vec{F}$, з якой поле

дзейнічае на пробны зарад q_0, што знаходзіцца ў абраным пункце, да значэння гэтага зараду:

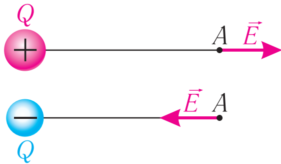
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \qquad (15.1)$$

З выразу (15.1) вынікае, што адзінкай напружанасці электрастатычнага поля ў СІ з'яўляецца ньютан на кулон $\left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right)$. Аднак у СІ шырока выкарыстоўваюць іншую назву гэтай адзінкі — вольт на метр $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$. Пакажыце самастойна, што $1\,\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1\,\frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Выраз (15.1) дазваляе вызначыць сілу, якая дзейнічае на пунктавы зарад q, змешчаны ў электрастатычнае поле напружанасцю $\vec{E}$, створанае іншым пунктавым зарадам Q:

$$\vec{F} = \vec{E}q.$$

Напружанасць поля, як і сіла, велічыня вектарная. Напрамак напружанасці поля супадае з напрамкам сілы, якая дзейнічае на дадатны пробны электрычны зарад. Напружанасць у любым пункце электрастатычнага поля накіравана ўздоўж прамой, якая злучае гэты пункт і пунктавы зарад, што стварае поле. Напружанасць поля, створанага пунктавым дадатным зарадам $Q > 0$, накіравана ад зараду, а напружанасць поля, створанага пунктавым адмоўным зарадам $Q < 0$, — да зараду (рыс. 87).



Рыс. 87

Напружанасць поля, створанага пунктавым зарадам. Знойдзем напружанасць электрастатычнага поля, створанага пунктавым зарадам, модуль якога $|Q|$. Змесцім у некаторы пункт поля дадатны пробны зарад q_0. Згодна з законам Кулона модуль сілы, якая дзейнічае на пробны зарад $F = k\frac{|Q| \cdot q_0}{r^2}$, дзе r — адлегласць паміж зарадам Q, які стварае поле, і пунктам, у які змешчаны пробны зарад q_0. Падстаўляючы выраз для модуля кулонаўскай сілы ў формулу для модуля напружанасці поля, атрымаем:

$$E = \frac{F}{q_0} = k\frac{|Q| \cdot q_0}{q_0 r^2} = k\frac{|Q|}{r^2}.$$

Модуль напружанасці поля, створанага раўнамерна зараджанай сферай, зарад якой Q, у пунктах на яе паверхні і па-за сферай на адлегласці r ад яе цэнтра вызначаюць па формуле $E = k\frac{|Q|}{r^2}$. У пунктах, якія знаходзяцца ўнутры сферы, як мы ўбачым далей, $\vec{E} = \vec{0}$.

Напружанасць электрастатычнага поля раўнамерна зараджанай бясконцай плоскасці аднолькавая ва ўсіх пунктах паўпрасторы з кожнага боку ад плоскасці (пры гэтым $\vec{E}_1 = -\vec{E}_2$), а яе модуль

$$\left|\vec{E}_1\right| = \left|\vec{E}_2\right| = E = \frac{q}{2\varepsilon_0 S},$$

дзе S — плошча некаторага ўчастка плоскасці, q — зарад гэтага ўчастка.

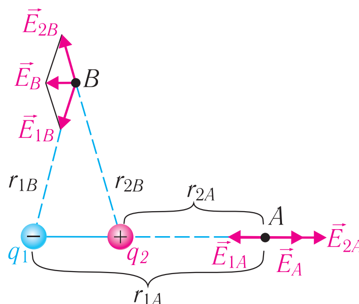
Прынцып суперпазіцыі электрычных палёў. Калі зараджаныя целы, якія ствараюць электрастатычныя палі, не змяняюць свайго стану (размеркавання электрычных зарадаў) у залежнасці ад прысутнасці ці адсутнасці іншых цел, то напружанасць $\vec{E}$ выніковага поля, якое ўтворана накладаннем дадзеных палёў у некаторым пункце:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots + \vec{E}_n,$$

дзе $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \ldots, \vec{E}_n$ — напружанасці палёў у вызначаным пункце, якія ствараюцца 1-м, 2-м, 3-м, ..., n-м зараджаным целам у адсутнасць іншых (як зараджаных, так і незараджаных) цел.

Самым простым прыкладам праявы прынцыпу суперпазіцыі з'яўляюцца электрастатычныя палі, створаныя рознымі пунктавымі зарадамі: **калі ў пэўным пункце прасторы электрастатычныя палі ствараюцца сістэмай пунктавых зарадаў, напружанасці якіх у вызначаным пункце $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$, ..., $\vec{E}_n$, то напружанасць $\vec{E}$ выніковага поля ў гэтым пункце роўная вектарнай суме напружанасцей палёў, якія ствараюцца кожным з пунктавых зарадаў сістэмы паасобна.**

На рысунку 88 паказана, як можна вызначыць напружанасць выніковага поля, створанага двума пунктавымі электрычнымі зарадамі супрацьлеглых знакаў $q_1 < 0$ і $q_2 > 0$, у пунктах A і B.



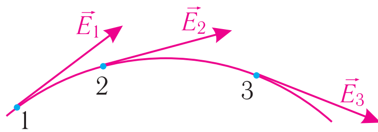
Рыс. 88

Напружанасці $\vec{E}_{1A}$ і $\vec{E}_{2A}$ палёў, створаных зарадамі q_1 і q_2, у пункце A накіраваны ўздоўж

прамой, якая злучае зарады, у супрацьлеглыя бакі. Напружанасць $\vec{E}_A$ выніковага поля ў пункце A роўная вектарнай суме напружанасцей $\vec{E}_{1A}$ і $\vec{E}_{2A}$ і таксама накіравана ўздоўж прамой, якая злучае зарады. Напружанасць $\vec{E}_B$ выніковага поля ў пункце B, які знаходзіцца па-за прамой, што злучае зарады, роўная вектарнай суме напружанасцей $\vec{E}_{1B}$ і $\vec{E}_{2B}$. Вызначыць яе можна паводле правіла паралелаграма (гл. рыс. 88).

Аналагічна вызначаюць напружанасць і для электрастатычнага поля сістэмы праводных канцэнтрычных зараджаных сфер.

Лініі напружанасці электрастатычнага поля. Каб наглядна паказваць размеркаванне поля ў прасторы, Фарадэй у 1845 г. прапанаваў спосаб адлюстравання электрычных палёў у выглядзе ўяўных ліній, названых лініямі напружанасці (сілавымі лініямі).

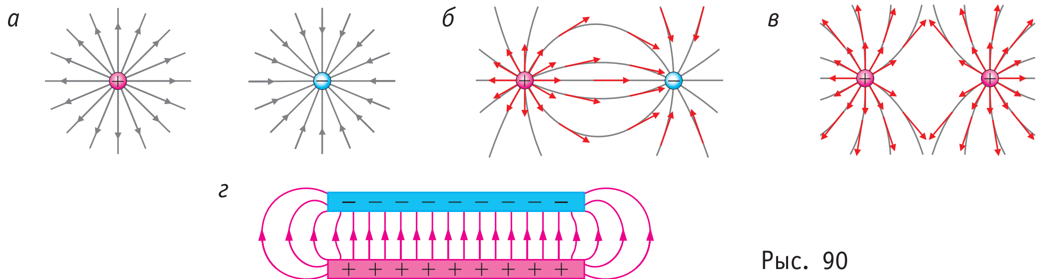


Рыс. 89

Лініі напружанасці — уяўныя накіраваныя лініі, датычныя да якіх у кожным пункце поля супадаюць па напрамку з напружанасцю электрастатычнага поля ў тым жа пункце (г. зн. з напрамкам электрастатычнай сілы, якая дзейнічае на дадатны зарад) (рыс. 89).

Відавочна, што праз любы пункт поля, у якім $\vec{E} \neq \vec{0}$, можна правесці адну і толькі адну лінію напружанасці. У кожным такім пункце напружанасць мае зусім пэўны напрамак.

На рысунку 90, *а* паказаны лініі напружанасці палёў, створаных зарадамі, раўнамерна размеркаванымі па паверхні адасобленых праводных шарыкаў. Напрамак кожнай стрэлкі на рысунку 90, *а* супадае з напрамкам напружанасці поля. Лініі напружанасці ў першым выпадку накіраваны ад дадатнага зараду ў бясконцасць, а ў другім — з бясконцасці да адмоўнага зараду і за-



Рыс. 90

канчваюцца на ім. У электрастатычным полі лініі напружанасці пачынаюцца і заканчваюцца на электрычных зарадах нават тады, калі адным сваім канцом сыходзяць у бясконцасць, дзе і знаходзяцца зарады, якія адсутнічаюць на рысунку.

На рысунку 90, *б* паказаны лініі напружанасці электрастатычнага поля, створанага двума рознаіменнымі зарадамі, модулі якіх аднолькавыя, засяроджаных на праводных шарыках. Стрэлкі паказваюць напрамкі напружанасці поля ў розных яго пунктах.

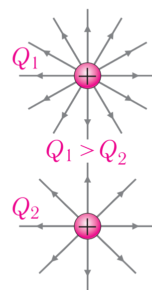
На рысунку 90, *в* паказаны лініі напружанасці электрастатычнага поля двух аднолькава зараджаных шарыкаў.

На рысунку 90, *г* адлюстравана поле, створанае зарадамі супрацьлеглых знакаў, модулі якіх аднолькавыя, што знаходзяцца на двух плоскіх металічных пласцінах, даўжыня якіх значна большая за адлегласць паміж імі. Лініі напружанасці такога поля паралельныя адна адной за выключэннем прасторы каля краёў пласцін і па-за межамі іх перакрыцця. Электрастатычнае поле ў цэнтральнай частцы паміж рознаіменна зараджанымі металічнымі пласцінамі з'яўляецца прыкладам *аднароднага поля*. Электрастатычныя палі, паказаныя на рысунку 90, *а, б, в,* з'яўляюцца неаднароднымі, паколькі або модуль, або напрамак (або і тое і другое) напружанасці ў розных пунктах поля адрозніваюцца.

Электрастатычнае поле, напружанасць якога ў любым яго пункце аднолькавая, называюць аднародным электрастатычным полем.

Лініі напружанасці электрастатычнага поля не перарываюцца ў прасторы (пры адсутнасці ў ёй іншых зарадаў), ніколі не перасякаюцца і не датыкаюцца адна да адной.

Каб лініі напружанасці адлюстроўвалі не толькі напрамак, але і модуль напружанасці поля, на рысунках іх дамовіліся праводзіць з пэўнай гушчынёй. Гушчыня ліній напружанасці ў прасторы залежыць ад модуля напружанасці поля: лініі напружанасці больш густыя там, дзе модуль напружанасці поля большы, і радзейшыя там, дзе ён меншы. У аднародным электрастатычным полі гушчыня ліній напружанасці не мяняецца. Карціну ліній напружанасці прынята будаваць так, каб яна па магчымасці адлюстроўвала сіметрыю электрастатычнага поля, якое паказваецца. Колькасць ліній напружанасці, пачаткам або канцом якіх служыць дадзены зарад, прапарцыянальная значэнню гэтага зараду (рыс. 91).



Рыс. 91

1. Поле, якое ствараецца нерухомымі адносна выкарыстоўваемай інерцыяльнай сістэмы адліку электрычнымі зарадамі, называюць электрастатычным полем.

2. Напружанасцю электрастатычнага поля ў любым яго пункце называюць фізічную вектарную велічыню, якая характарызуе сілавое дзеянне поля на ўнесеныя ў яго зарады і роўная адносіне сілы, з якой поле дзейнічае на пробны зарад, што знаходзіцца ў абраным пункце, да значэння гэтага зараду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

3. Модуль напружанасці поля, створанага ў вакууме або паветры пунктавым зарадам, прама прапарцыянальны модулю гэтага зараду і адваротна прапарцыянальны квадрату адлегласці паміж зарадам і пунктам, у якім вызначаюць значэнне напружанасці:

$$E = k\frac{|Q|}{r^2}.$$

4. Лініі напружанасці — уяўныя накіраваныя лініі, датычныя да якіх у кожным пункце поля супадаюць па напрамку з напружанасцю электрастатычнага поля. Лініі напружанасці пачынаюцца на дадатных зарадах і заканчваюцца на адмоўных, нідзе не перарываюцца ў прасторы, якая не змяшчае іншых зарадаў, не перасякаюцца і не датыкаюцца адна да адной.

5. Электрастатычнае поле, напружанасць якога ў любым яго пункце аднолькавая, называюць аднародным электрастатычным полем.

1. Якое поле называюць электрастатычным? Якія асноўныя яго асаблівасці?

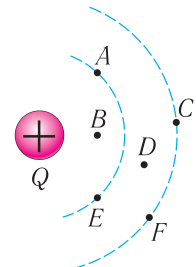
2. Што называюць напружанасцю электрастатычнага поля?

3. Як разлічыць напружанасць электрастатычнага поля пунктавага зараду ў абраным пункце?

4. Як зменіцца напружанасць поля пунктавага зараду Q, калі: а) адлегласць r ад зараду да пункта назірання павялічыць у два разы; б) зарад Q павялічыць у два разы, а адлегласць r ад зараду да пункта назірання паменшыць у два разы?

5. Пробны зарад змяшчаюць у розныя пункты электрастатычнага поля, створанага зарадам Q (рыс. 92). У якім пункце модуль напружанасці поля будзе найбольшым? найменшым? У якіх пунктах ён аднолькавы?

6. У чым заключаецца прынцып суперпазіцыі палёў?



Рыс. 92

7. Што называюць лініямі напружанасці электрастатычнага поля? Якія іх асаблівасці?

8. Як накіраваны лініі напружанасці электрастатычнага поля зараду ў залежнасці ад яго знака? сістэмы двух зарадаў (аднайменных і рознаіменных)?

9. Якое электрастатычнае поле называюць аднародным? Прывядзіце прыклады.

10*. Гравітацыйнае поле Зямлі таксама можна характарызаваць напружанасцю. Параўнайце выразы для электрычнай сілы $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$ і сілы цяжару $\vec{F}_ц = m\vec{g}$. Чаму роўная напружанасць гравітацыйнага поля Зямлі каля яе паверхні?

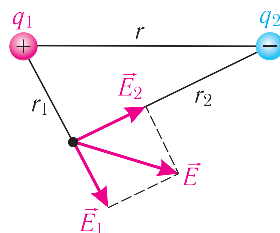
Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Два нерухомыя пунктавыя зарады $q_1 = 6{,}70$ нКл і $q_2 = -13{,}3$ нКл знаходзяцца ў паветры на адлегласці $r = 5{,}00$ см адзін ад аднаго. Вызначце модуль напружанасці электрастатычнага поля ў пункце, які знаходзіцца на адлегласці $r_1 = 3{,}00$ см ад дадатнага зараду і $r_2 = 4{,}00$ см ад адмоўнага.

Дадзена:
$q_1 = 6{,}70$ нКл $= 6{,}70 \cdot 10^{-9}$ Кл
$q_2 = -13{,}3$ нКл $= -1{,}33 \cdot 10^{-8}$ Кл
$r = 5{,}00$ см $= 5{,}00 \cdot 10^{-2}$ м
$r_1 = 3{,}00$ см $= 3{,}00 \cdot 10^{-2}$ м
$r_2 = 4{,}00$ см $= 4{,}00 \cdot 10^{-2}$ м

E — ?

Рашэнне. Згодна з прынцыпам суперпазіцыі напружанасць выніковага поля $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (рыс. 93) вызначаюць паводле правіла паралелаграма. Тут $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_2$ — напружанасці палёў, створаных пунктавымі зарадамі q_1 і q_2 у дадзеным пункце. З умовы задачы і тэарэмы, адваротнай тэарэме Піфагора, вынікае, што вугал паміж $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_2$ прамы. Модуль напружанасці E выніковага поля знойдзем па тэарэме Піфагора: $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$. Паколькі зарады q_1 і q_2 пунктавыя, то $E_1 = k\dfrac{q_1}{r_1^2}$, $E_2 = k\dfrac{|q_2|}{r_2^2}$. З улікам гэтага $E = k\sqrt{\left(\dfrac{q_1}{r_1^2}\right)^2 + \left(\dfrac{q_2}{r_2^2}\right)^2}$.



Рыс. 93

$$E = 8{,}99 \cdot 10^9\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}\sqrt{\left(\frac{6{,}70 \cdot 10^{-9}\ \text{Кл}}{(3{,}00 \cdot 10^{-2}\ \text{м})^2}\right)^2 + \left(\frac{1{,}33 \cdot 10^{-8}\ \text{Кл}}{(4{,}00 \cdot 10^{-2}\ \text{м})^2}\right)^2} = 100\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Адказ: $E = 100\ \dfrac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

Прыклад 2. Першапачаткова нерухомы шарык масай $m = 10$ г і зарадам $q = 10$ нКл пачынае падаць з паскарэннем, модуль якога $a = 8{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, у вертыкальным аднародным электрастатычным полі. Вызначце напружанасць гэтага поля. Механічнае супраціўленне асяроддзя не прымайце пад увагу.

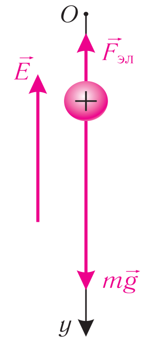
Дадзена:
$m = 10\text{ г} = 1{,}0 \cdot 10^{-2}\text{ кг}$
$q = 10\text{ нКл} = 1{,}0 \cdot 10^{-8}\text{ Кл}$
$a = 8{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

$\vec{E}$ — ?

Рашэнне. У пачатковы момант на шарык дзейнічае сіла цяжару $\vec{F}_{\text{ц}} = m\vec{g}$ з боку гравітацыйнага поля Зямлі і электрычная сіла $\vec{F}_{\text{эл}} = q\vec{E}$ з боку аднароднага электрастатычнага поля. Модуль паскарэння, з якім пачынае падаць дадатна зараджаны шарык, меншы за модуль паскарэння свабоднага падзення $g = 9{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Значыць, электрычная сіла $\vec{F}_{\text{эл}}$ накіравана вертыкальна ўверх і супадае па напрамку з напружанасцю электрастатычнага поля (рыс. 94). Модуль напружанасці вызначым, выкарыстаўшы другі закон Ньютана: $m\vec{g} + \vec{F}_{\text{эл}} = m\vec{a}$. У праекцыі на вертыкальную вось Oy (гл. рыс. 94) гэта ўраўненне мае выгляд $mg - qE = ma$.

Адсюль $E = \frac{m(g-a)}{q}$.

$$E = \frac{1{,}0 \cdot 10^{-2}\text{ кг} \cdot \left(9{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} - 8{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right)}{1{,}0 \cdot 10^{-8}\text{ Кл}} = 1{,}8 \cdot 10^6\ \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1{,}8\ \frac{\text{МВ}}{\text{м}}.$$



Рыс. 94

Адказ: напружанасць электрастатычнага поля накіравана вертыкальна ўверх і яе модуль $E = 1{,}8\ \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$.

Практыкаванне 13

1. У аднароднае электрастатычнае поле, модуль напружанасці якога $E = 160\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, змяшчаюць зарад $q = 4{,}00$ нКл. Вызначце, чаму роўны модуль сілы, што дзейнічае на зарад з боку электрастатычнага поля.

2. Вызначце модуль пунктавага зараду, які знаходзіцца ў паветры, калі на адлегласці $r = 1{,}0$ см ад зараду модуль напружанасці поля $E = 3{,}6\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

3. Два дадатныя пунктавыя зарады знаходзяцца на адлегласці $r_0 = 10$ см адзін ад аднаго. У пункце, размешчаным на прамой, якая злучае зарады, на

адлегласці $r_1 = 8{,}0$ см ад першага зараду модуль напружанасці выніковага электрастатычнага поля роўны нулю. Вызначце адносіну зарадаў $\frac{q_1}{q_2}$.

4. Пылінка масай $m = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$ г мае зарад $q = 5{,}0 \cdot 10^{-12}$ Кл. Вызначце напружанасць вертыкальнага аднароднага электрастатычнага поля, у якім пылінка будзе знаходзіцца ў раўнавазе.

5. Шарык масай $m = 0{,}040$ г і зарадам $q = 34$ пКл падвешаны на шаўковай нітцы. Вызначце, на які вугал ад вертыкалі адхіліцца нітка з шарыкам, калі шарык змясціць у аднароднае гарызантальнае электрастатычнае поле, модуль напружанасці якога $E = 1{,}01 \cdot 10^6 \ \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

6. Адлегласць паміж пунктавымі зарадамі $q_1 = 3{,}2 \cdot 10^{-9}$ Кл і $q_2 = -3{,}2 \cdot 10^{-9}$ Кл складае $r_0 = 12$ см. Вызначце напружанасць поля ў пункце, аддаленым ад абодвух зарадаў на адлегласць $r = 8{,}0$ см.

7. Тры аднолькавыя адмоўныя пунктавыя зарады, модулі якіх $|q| = 2{,}0$ нКл, размешчаны ў вяршынях раўнабедранага прамавугольнага трохвугольніка. Вызначце напружанасць электрастатычнага поля ў пункце, які знаходзіцца на сярэдзіне гіпатэнузы, даўжыня якой $a = 8{,}0$ см.

8*. Эксперыментальныя факты сведчаць пра тое, што ўздзеянне нерухомых у дадзенай інерцыяльнай сістэме адліку пунктавых зарадаў (створанага імі электрастатычнага поля) на пунктавы зарад, які рухаецца, можа быць апісана законам Кулона з прымальнай дакладнасцю. Вызначце паскарэнне, з якім пачне рухацца часціца масай $m = 2{,}0$ мг і зарадам $q = 9{,}5$ пКл у аднародным гарызантальна накіраваным электрастатычным полі, модуль напружанасці якога $E = 8{,}0 \cdot 10^5 \ \frac{\text{В}}{\text{м}}$. Які шлях пройдзе гэта часціца за першую секунду руху?

§ 16. Патэнцыяльнасць электрастатычнага поля. Патэнцыял

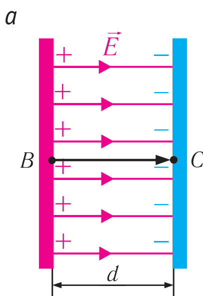
Электрастатычнае поле, дзейнічаючы з пэўнай сілай на зарады, якія ў ім знаходзяцца, можа іх перамяшчаць. З механікі вы ведаеце, што пры перамяшчэнні цела дзеючая на яго сіла выконвае работу. Высветлім, ад чаго залежыць работа сілы па перамяшчэнні электрычнага зараду ў электрастатычным полі.

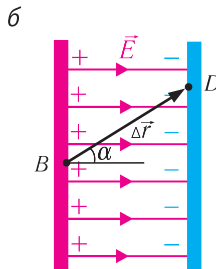
Работа сілы аднароднага электрастатычнага поля па перамяшчэнні электрычнага зараду. У агульным выпадку работа сіл электрычнага поля пры перамяшчэнні зараду залежыць як ад яго пачатковага і канчатковага становішчаў, так і ад віду траекторыі, па якой рухаецца зарад.

Аднак электрастатычнае поле мае важную асаблівасць. Работа сіл гэтага поля пры перамяшчэнні зараду паміж двума пунктамі залежыць толькі ад становішча гэтых пунктаў і не залежыць ад віду траекторыі. Такой жа асаблівасцю валодае і гравітацыйнае поле. Фізічныя палі, работа сіл якіх не залежыць ад формы траекторыі, называюць *патэнцыяльнымі* (або кансерватыўнымі). Пакажам, што электрастатычнае поле патэнцыяльнае.

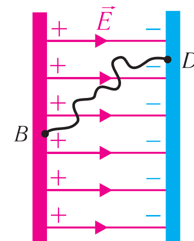
Няхай дадатны пробны зарад q_0 перамяшчаюць у аднародным электрастатычным полі напружанасцю $\vec{E}$ з пункта B у пункт C уздоўж лініі напружанасці дадзенага поля (рыс. 95, *а*). Пры гэтым сіла $\vec{F}$, з якой поле дзейнічае на зарад q_0, выконвае работу. У скалярным выглядзе выраз для работы мае выгляд $A = F\Delta r \cos\alpha$, дзе α — вугал паміж сілай $\vec{F}$ і перамяшчэннем $\Delta\vec{r}$ зараду. Модуль электрычнай сілы $F = q_0E$, $\cos\alpha = 1$ (напрамкі сілы і перамяшчэння зараду супадаюць), а $\Delta r = d$, дзе d — адлегласць паміж пунктамі B і C. Тады работа сілы аднароднага электрастатычнага поля па перамяшчэнні зараду:

$$\boldsymbol{A = q_0Ed.} \qquad (16.1)$$





Рыс. 95



Рыс. 96

Калі зарад перамяшчаюць па прамой з пункта B у пункт D пад вуглом α да напрамку напружанасці поля $\vec{E}$ (рыс. 95, *б*), то $\Delta r\cos\alpha = d$. Работа сілы поля па перамяшчэнні зараду і ў гэтым выпадку:

$$A_{BD} = F\Delta r\cos\alpha = q_0Ed.$$

Відавочна, што для перамяшчэння зараду ў адваротным напрамку (з пункта D у пункт B) знешняй сіле патрабуецца, пераадольваючы сілу поля, выканаць работу, мінімальнае значэнне якой будзе такім жа: $A_{DB}^{\text{знеш}} = A_{BD}$, таму $A_{BD} = -A_{DB}$. Такім чынам, калі зарад вяртаецца ў пачатковы пункт, г. зн. пры руху зараду па замкнутай траекторыі, работа сілы поля роўная нулю.

Дапусцім, што перамяшчэнне зараду з пункта B у пункт D адбываецца ў аднародным электрастатычным полі напружанасцю $\vec{E}$ па крывалінейнай траекторыі (рыс. 96). У гэтым выпадку траекторыю можна разбіць на такія малыя ўчасткі, каб кожны з іх можна было лічыць прамалінейным. Калі алгебраічна падсумаваць работы сілы на кожным з гэтых участкаў, то атрымаем:

$$A = q_0E(\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3 + \ldots + \Delta d_n) = q_0Ed,$$

дзе $\Delta d_i = \Delta r_i \cos\alpha_i$, Δr_i — модуль перамяшчэння на i-м малым участку траекторыі, α_i — вугал паміж напрамкамі перамяшчэння $\Delta\vec{r_i}$ і напружанасці $\vec{E}$ поля ($i = 1$, 2, 3, ..., n).

Такім чынам, *работа сілы аднароднага электрастатычнага поля па перамяшчэнні зараду з аднаго пункта поля ў другі не залежыць ад формы траекторыі, г. зн. аднароднае электрастатычнае поле патэнцыяльнае.*

Выкарыстаўшы закон захавання энергіі, можна паказаць, што любое электрастатычнае поле з'яўляецца патэнцыяльным. Гэта азначае, што электрастатычнае і гравітацыйнае палі маюць падобныя ўласцівасці, якія вызначаюцца іх патэнцыяльным характарам. У дачыненні да электрастатычнага поля гэтыя ўласцівасці выяўляюцца ў наступным:

а) Пунктавы электрычны зарад, які знаходзіцца ў любым пункце электрастатычнага поля, валодае патэнцыяльнай энергіяй узаемадзеяння з гэтым полем, значэнне якой вызначаюць адносна адвольна выбранага нулявога пункта. У нулявым пункце патэнцыяльную энергію зараду прымаюць роўнай нулю. *Патэнцыяльная энергія ўзаемадзеяння пунктавага зараду з электрастатычным полем роўная рабоце, якую выканалі б сілы поля пры перамяшчэнні дадзенага зараду з вызначанага пункта поля ў нулявы пункт.*

б) *Работа сіл электрастатычнага поля па перамяшчэнні электрычнага зараду з пачатковага пункта 1 у канцавы пункт 2 роўная прырашчэнню (змяненню) патэнцыяльнай энергіі зараду ў полі, узятаму са знакам мінус, або змяншэнню патэнцыяльнай энергіі:*

$$A_{12} = -\Delta W_{\text{п}12} = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = W_{\text{п}1} - W_{\text{п}2}, \qquad (16.2)$$

дзе $W_{\text{п}1}$ і $W_{\text{п}2}$ — патэнцыяльныя энергіі зараду, які перамяшчаецца, у пачатковым і канцавым пунктах электрастатычнага поля.

Трэба падкрэсліць, што патэнцыяльная энергія — гэта *энергія ўзаемадзеяння*, і яе неабходна адносіць не да зараджанай часціцы або цела, а да сістэмы ў цэлым. У прыватнасці, для зараджанай часціцы (цела), якая знаходзіцца ў электрастатычным полі, гэта патэнцыяльная энергія ўзаемадзеяння зараджанай часціцы з полем, г. зн. з іншымі зараджанымі часціцамі і (або) целамі, якія з'яўляюцца крыніцамі гэтага поля. Коратка гэта прынята фармуляваць так: патэнцыяльная энергія зараду ў полі.

Знак «мінус» у выразе (16.2) азначае, што калі сіла электрастатычнага поля выконвае дадатную работу (падобна сіле гравітацыйнага поля Зямлі пры падзенні каменя), то патэнцыяльная энергія зараджанага цела ў полі памяншаецца: $\Delta W_п < 0$. Пры гэтым згодна з законам захавання энергіі пад уздзеяннем толькі сіл электрастатычнага поля (іншыя сілы адсутнічаюць) павялічваецца кінетычная энергія цела: $\frac{mv_2^2}{2} > \frac{mv_1^2}{2}$. На гэтым заснавана паскарэнне зараджаных часціц электрастатычным полем. Калі работа сіл электрастатычнага поля адмоўная (падобна рабоце сілы гравітацыйнага поля пры руху каменя, кінутага ўверх), то патэнцыяльная энергія павялічваецца: $\Delta W_п > 0$. Пры гэтым кінетычная энергія зараджанага цела пры адсутнасці неэлектрастатычных сіл памяншаецца: $\frac{mv_2^2}{2} < \frac{mv_1^2}{2}$.

Патэнцыял электрастатычнага поля як яго энергетычная характарыстыка. З выразаў (16.1) і (16.2) вынікае, што прырашчэнне (змяненне) патэнцыяльнай энергіі зараду ў аднародным электрастатычным полі пры яго перамяшчэнні з пункта *1* у пункт *2* поля прапарцыянальнае значэнню гэтага зараду. Як сведчаць вынікі шматлікіх эксперыментаў, гэта прапарцыянальнасць захоўваецца і для неаднароднага электрастатычнага поля. Пасля выбару пункта поля, у якім патэнцыянальная энергія зараду прынята роўнай нулю, значэнні патэнцыяльнай энергіі зараду ва ўсіх астатніх пунктах поля *адназначна вызначаюцца* формулай (16.2). Калі ў адвольна выбраны пункт электрастатычнага поля па чарзе ўносіць пробныя зарады q_{01}, q_{02}, q_{03}, q_{04} ..., значэнні якіх адрозніваюцца ў 2, 3, 4 і г. д. разоў, то патэнцыяльныя энергіі $W_{п1}$, $W_{п2}$, $W_{п3}$, $W_{п4}$ ... гэтых зарадаў будуць прама прапарцыянальныя іх значэнням.

Такім чынам, адносіна патэнцыяльнай энергіі пробнага зараду ў полі да значэння гэтага зараду для дадзенага пункта поля застаецца нязменнай. Гэта адносіна з'яўляецца энергетычнай характарыстыкай электрастатычнага поля і носіць назву *патэнцыял*.

Патэнцыялам φ электрастатычнага поля ў дадзеным пункце прасторы называюць фізічную скалярную велічыню, якая характарызуе энергетычны стан поля ў дадзеным пункце прасторы і роўная адносіне патэнцыяльнай энергіі $W_п$ пунктавага (пробнага) зараду q_0, змешчанага ў дадзены пункт поля, да значэння гэтага зараду:

$$\varphi = \frac{W_п}{q_0}. \quad (16.3)$$

Паколькі патэнцыяльная энергія зараду ў электрастатычным полі залежыць ад выбару нулявога пункта, то гэтая залежнасць захоўваецца і для патэнцыялу. Калі прыняць, што на бясконца вялікай адлегласці ад крыніцы поле адсутнічае, г. зн. патэнцыяльная энергія сістэмы «зарад — электрастатычнае поле» на бясконцасці роўная нулю, то патэнцыял поля ў дадзеным пункце можна вызначыць наступным чынам:

$$\varphi_1 = \frac{W_{п1}}{q_0} = \frac{A_{1\to\infty}}{q_0}.$$

Патэнцыял электрастатычнага поля ў дадзеным пункце лікава роўны рабоце, якую выконваюць сілы поля пры перамяшчэнні адзінкавага дадатнага зараду з дадзенага пункта ў бясконцасць.

За адзінку патэнцыялу ў СІ прыняты вольт (В). Адзінка названа ў гонар італьянскага вучонага Алясандра Вольта (1745—1827), які зрабіў вялікі ўклад у вывучэнне электрычных з'яў. 1 В — патэнцыял такога пункта электрастатычнага поля, у якім зарад 1 Кл валодаў бы патэнцыяльнай энергіяй 1 Дж.

Патэнцыял φ электрастатычнага поля пунктавага зараду q на адлегласці r ад яго ў вакууме або ў паветры вызначаюць суадносінай

$$\varphi = \boldsymbol{k}\frac{q}{r}. \quad (16.4)$$

Знак зараду-крыніцы поля вызначае знак патэнцыялу гэтага поля.

Патэнцыял поля, што ствараецца раўнамерна зараджанай сферай радыусам R, зарад якой q, у вакууме або ў паветры ў пунктах па-за сферай на адлегласці $r > R$ ад яе цэнтра вызначаюць па формуле $\varphi = k\frac{q}{r}$. У пунктах, якія знаходзяцца на паверхні і ўнутры сферы, $\varphi = k\frac{q}{R}$.

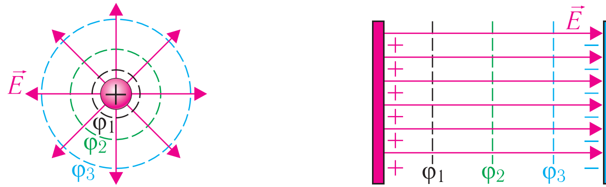
Для патэнцыялу выконваецца *прынцып суперпазіцыі*: **калі поле створана сістэмай n пунктавых зарадаў, то патэнцыял φ такога поля ў любым пункце прасторы роўны алгебраічнай суме патэнцыялаў палёў у гэтым жа**

пункце прасторы, створаных кожным з пунктавых зарадаў сістэмы паасобна:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \ldots + \varphi_n. \qquad (16.5)$$

Геаметрычнае месца пунктаў у электрастатычным полі, патэнцыялы якіх аднолькавыя, называюць *эквіпатэнцыяльнай паверхняй*.

Выкарыстоўваючы эквіпатэнцыяльныя паверхні, можна графічна адлюстроўваць электрастатычныя палі. Праз кожны пункт поля праходзіць толькі адна лінія напружанасці і адна эквіпатэнцыяльная паверхня. У кожным пункце электрастатычнага поля лінія напружанасці і эквіпатэнцыяльная паверхня ўзаемна перпендыкулярныя (рыс. 97). Паказ электрастатычнага поля з дапамогай эквіпатэнцыяльных паверхняў, як і тэрмін «патэнцыял», увёў нямецкі вучоны К. Ф. Гаус у 1840 г.



Рыс. 97

1. Работа сіл электрастатычнага поля па перамяшчэнні зараду з аднаго пункта поля ў другі не залежыць ад формы траекторыі. Работа сіл поля па перамяшчэнні зараду па замкнутай траекторыі роўная нулю. Электрастатычнае поле — патэнцыянальнае.

2. Работа сілы аднароднага электрастатычнага поля па перамяшчэнні зараду

$$A = qEd.$$

3. Работа сіл электрастатычнага поля па перамяшчэнні зараду з пачатковага пункта *1* у канцавы пункт *2* роўная прырашчэнню (змяненню) патэнцыяльнай энергіі зараду ў гэтым полі, узятаму са знакам мінус, або змяншэнню патэнцыяльнай энергіі:

$$A_{12} = -\Delta W_{\text{п}12} = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = W_{\text{п}1} - W_{\text{п}2}.$$

4. Патэнцыялам электрастатычнага поля ў дадзеным пункце прасторы называюць фізічную скалярную велічыню, якая характарызуе энергетычны стан поля ў дадзеным пункце прасторы і роўная адносіне патэнцыяльнай энергіі пунктавага (пробнага) зараду, змешчанага ў дадзены пункт поля, да значэння гэтага зараду:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q_0}.$$

5. Калі поле створана сістэмай пунктавых зарадаў, то яго патэнцыял у дадзеным пункце прасторы роўны алгебраічнай суме патэнцыялаў палёў у гэтым пункце, створаных кожным з пунктавых зарадаў сістэмы паасобна:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \ldots + \varphi_n.$$

?

1. Як вызначыць работу сілы аднароднага электрастатычнага поля па перамяшчэнні электрычнага зараду?

2. Як вы разумееце сцверджанне «электрастатычнае поле — патэнцыяльнае»? Як звязана работа сіл электрастатычнага поля па перамяшчэнні электрычнага зараду са змяненнем патэнцыяльнай энергіі зараду ў гэтым полі?

3. Дакажыце, што работа сіл электрастатычнага поля па перамяшчэнні зараду па замкнутай траекторыі роўная нулю.

4. У чым праяўляецца падабенства электрастатычнага і гравітацыйнага палёў?

5. Якія дзве фізічныя велічыні характарызуюць электрастатычнае поле ў любым яго пункце?

6. Што называюць патэнцыялам электрастатычнага поля?

7. Дадатна зараджаная часціца перамяшчаецца пад дзеяннем сіл электрастатычнага поля на некаторую адлегласць. У якім пункце траекторыі руху часціцы — пачатковым або канцавым — патэнцыял поля вышэйшы, калі модуль яе скорасці: а) павялічваецца; б) памяншаецца?

8. Адмоўна зараджаная часціца перамяшчаецца пад дзеяннем сіл толькі электрастатычнага поля на некаторую адлегласць. У якім пункце траекторыі руху часціцы — пачатковым або канцавым — патэнцыял поля вышэйшы?

9. Чаму роўны патэнцыял электрастатычнага поля пунктавага зараду q на адлегласці r ад яго?

10. Чаму роўны патэнцыял электрастатычнага поля раўнамерна зараджанай сферы радыусам R на адлегласці r ад яе цэнтра, калі: а) $r \leq R$; б) $r > R$, а зарад сферы q?

11. Як вызначыць патэнцыял электрастатычнага поля, створанага некалькімі пунктавымі зарадамі?

Прыклад рашэння задачы

Электрон, рухаючыся са скорасцю, модуль якой $v_1 = 4{,}0 \cdot 10^5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, трапляе ў аднароднае электрастатычнае поле, напрамак ліній напружанасці якога супадае з напрамкам яго скорасці. Прайшоўшы адлегласць $d = 2{,}0$ см, электрон пачынае рухацца ў адваротным напрамку. Вызначце модуль напружанасці электрастатычнага поля. Як змянілася патэнцыяльная энергія ўзаемадзеяння электрона з полем да моманту змены напрамку руху? Маса электрона $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Дадзена:

$v_1 = 4{,}0 \cdot 10^5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$

$v_2 = 0{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$

$d = 2{,}0$ см $= 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ м

$e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл

$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг

E — ?

$\Delta W_\text{п}$ — ?

Рашэнне. Да змены напрамку руху сіла аднароднага электрастатычнага поля выконвае адмоўную работу па тармажэнні электрона:

$$A = \frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2} = -\frac{m_e v_1^2}{2}.$$

Гэту работу таксама можна вызначыць па формуле $A = eEd$.

Значыць, $-\frac{m_e v_1^2}{2} = eEd$. Тады $E = \frac{m_e v_1^2}{2|e|d}$.

$$E = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{кг} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{11}\ \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м}} = 23\ \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

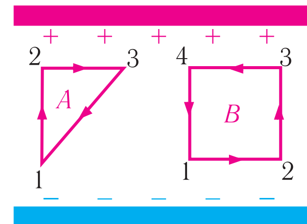
Згодна з законам захавання энергіі поўная энергія сістэмы «электрон—поле» застаецца нязменнай, г. зн. $\Delta W_\text{п} + \Delta W_\text{к} = 0$. Такім чынам, $\Delta W_\text{п} = -\left(\frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2}\right) = \frac{m_e v_1^2}{2}$, г. зн. патэнцыяльная энергія электрона ўзрастае на велічыню

$$\Delta W_\text{п} = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{кг} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{11}\ \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2} = 7{,}3 \cdot 10^{-20}\ \text{Дж}.$$

Адказ: $E = 23\ \frac{\text{В}}{\text{м}}$, $\Delta W_\text{п} = 7{,}3 \cdot 10^{-20}$ Дж.

Практыкаванне 14

1. Ці залежыць работа сіл электрастатычнага поля ад траекторыі руху зараду? Параўнайце работу сіл электрастатычнага поля, створанага заражанымі пласцінамі, пры перамяшчэнні зараду q па контуры A і контуры B (рыс. 98).



Рыс. 98

2. Адмоўны зарад, модуль якога $|q| = 0{,}50$ нКл, перамясцілі ў аднародным электрастатычным полі, модуль напружанасці якога $E = 2{,}0\ \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$, на адлег-

ласць $d = 10$ см у напрамку ліній напружанасці. Вызначце работу сілы поля, выкананую пры перамяшчэнні зараду, і змяненне патэнцыяльнай энергіі ўзаемадзеяння зараду з полем.

3. Пунктавы зарад $q = 5{,}0$ нКл перамяшчаюць у аднародным электрастатычным полі, модуль напружанасці якога $E = 40\ \frac{кВ}{м}$. Перамяшчэнне, модуль якога $\Delta r = 8{,}0$ см, утварае вугал $\alpha = 60^\circ$ з напрамкам ліній напружанасці поля. Вызначце работу сілы поля, змяненні патэнцыяльнай і кінетычнай энергій зараду, калі знешняя сіла забяспечвае толькі прамалінейнасць перамяшчэння зараду.

4. Работу, якую выконваюць сілы электрастатычнага поля пры пераносе зараду $q = 2{,}40$ нКл з бясконцасці ў некаторы пункт поля, $A = 72$ нДж. Вызначыце патэнцыял гэтага пункта поля. Што зменіцца, калі работу па пераносу першапачаткова нерухомага зараду выконваюць знешнія сілы супраць сіл электрастатычнага поля? Мінімальнае значэнне работы знешніх сіл $A_{зн} = 72$ нДж.

5. Модулі напружанасці двух пунктаў поля, створанага нерухомым пунктавым зарадам, адрозніваюцца ў дзевяць разоў. Вызначце, у колькі разоў адрозніваюцца патэнцыялы ў гэтых пунктах поля.

6. Электрастатычнае поле створана двума рознаіменнымі зарадамі, якія знаходзяцца на адлегласці $r = 80$ см адзін ад аднаго, модулі гэтых зарадаў $|q_1| = |q_2| = 6{,}4$ нКл. Вызначце модуль напружанасці і патэнцыял у сярэднім пункце адрэзка, які злучае гэтыя зарады.

7. У дзвюх вяршынях роўнастаронняга трохвугольніка са стараной даўжынёй $a = 25$ см знаходзяцца два зарады, модулі якіх $|q_1| = |q_2| = 5{,}0$ нКл. Вызначце патэнцыял поля ў трэцяй вяршыні трохвугольніка, калі: а) абодва зарады дадатныя; б) абодва зарады адмоўныя; в) зарады супрацьлеглых знакаў.

8. Электрон і пратон са стану спакою паскараюцца ў адным і тым жа аднародным электрастатычным полі да скарасцей, модулі якіх значна меншыя за скорасць святла. Вызначце адносіну модуляў скарасцей электрона і пратона пасля праходжання адной і той жа адлегласці. Маса электрона $m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг, маса пратона $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг.

9*. Два супрацьлеглыя па знаку пунктавыя зарады, модулі якіх роўныя, знаходзяцца ў паветры. У пункце на прамой, што злучае зарады, якая знаходзіцца на адлегласцях $r_1 = 10{,}0$ мм і $r_2 = 30{,}0$ мм ад зарадаў, патэнцыял электрастатычнага поля $\varphi = 75{,}0$ мВ. Вызначце модуль напружанасці поля ў гэтым пункце.

§ 17. Рознасць патэнцыялаў электрастатычнага поля. Напружанне. Сувязь паміж напружаннем і напружанасцю аднароднага электрастатычнага поля

Паколькі патэнцыяльная энергія любой сістэмы цел, сілы ўзаемадзеяння паміж якімі з'яўляюцца патэнцыяльнымі, залежыць ад выбару нулявога пункта (нулявога ўзроўню), то перад ажыццяўленнем такога выбару патэнцыяльная энергія сістэмы можа быць вызначана толькі з дакладнасцю да некаторай пастаяннай велічыні. Але змяненне патэнцыяльнай энергіі не залежыць ад значэння гэтай пастаяннай велічыні і адназначна характарызуе працэс пераходу сістэмы з аднаго стану ў другі. Гэта датычыцца і змянення патэнцыяльнай энергіі зараджанай часціцы (зараду) у электрастатычным полі.

Рознасць патэнцыялаў. Паняцце патэнцыялу істотнае для колькаснага апісання электрастатычнага поля разам з яго напружанасцю. Перамяшчэнне зараджаных часціц у электрастатычным полі, якое суправаджаецца змяненнем іх патэнцыяльнай энергіі, характарызуюць, выкарыстоўваючы паняцце «рознасць патэнцыялаў». Як і прырашчэнне (змяненне) патэнцыяльнай энергіі, рознасць патэнцыялаў не залежыць ад выбару нулявога пункта.

Рознасцю патэнцыялаў U_{12} паміж двума пунктамі электрастатычнага поля называюць фізічную скалярную велічыню, роўную адносіне работы A_{12}, якая выконваецца полем пры перамяшчэнні пробнага зараду q_0 з пачатковага пункта *1* у канцавы пункт *2*, да значэння зараду, што перамяшчаецца:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \frac{W_{п1} - W_{п2}}{q_0} = \frac{\varphi_1 q_0 - \varphi_2 q_0}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2. \qquad (17.1)$$

Рознасць патэнцыялаў вызначаецца змяншэннем патэнцыяльнай энергіі адзінкавага дадатнага зараду, які перамяшчаецца ў полі.

Велічыню, супрацьлеглую па знаку рознасці патэнцыялаў, называюць прырашчэннем (змяненнем) патэнцыялу: $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = -(\varphi_2 - \varphi_1) = -\Delta\varphi_{12}$.

За адзінку рознасці патэнцыялаў у СІ прымаюць вольт (В). 1 В — рознасць патэнцыялаў U_{12} такіх двух пунктаў поля, для якіх пры перамяшчэнні зараду 1 Кл з пункта *1* у пункт *2* сіла, што дзейнічае на зарад з боку поля, выканала б работу 1 Дж.

Патэнцыял праваднiка можна вымераць электрометрам. Для гэтага праваднік злучаюць са стрэлкай электрометра, корпус якога зазямляюць. Адхілен-

не стрэлкі электрометра пакажа наяўнасць рознасці патэнцыялаў паміж праваднікам і Зямлёй. Прыняўшы патэнцыял Зямлі роўным нулю, можна лічыць, што электрометр вымярае патэнцыял праваднікa.

Калі маюцца два зараджаныя праваднікі, то, злучыўшы адзін з іх са стрэлкай, а другі з корпусам электрометра, вымяраюць рознасць патэнцыялаў паміж зараджанымі праваднікамі.

Сувязь паміж напружаннем і напружанасцю аднароднага электрастатычнага поля. Тэрмін «напружанне» ўвёў у 1792 г. Вольта. Для электрастатычных палёў паняцці «электрычнае напружанне» і «рознасць патэнцыялаў» тоесныя.

Работа, якую выконвае аднароднае электрастатычнае поле напружанасцю $\vec{E}$ пры перамяшчэнні пробнага дадатнага зараду q_0 з пункта *1* з патэнцыялам φ_1 у пункт 2 з патэнцыялам $\varphi_2 < \varphi_1$, можа быць вызначана ў адпаведнасці з выразам (17.1)

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2),$$

а ў адпаведнасці з выразам (16.1)

$$A_{12} = q_0 E d,$$

дзе d — модуль перамяшчэння зараду ўздоўж лініі напружанасці электрастатычнага поля.

Прыраўняем адпаведныя часткі роўнасцей і знойдзем выраз, які ўстанаўлівае сувязь паміж модулем напружанасці аднароднага электрастатычнага поля і рознасцю патэнцыялаў, г. зн. паміж дзвюма характарыстыкамі электрастатычнага поля: $q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 E d$, адкуль

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = -\frac{\Delta\varphi_{12}}{d}.$$

Прымаючы пад увагу, што $U_{12} = -\Delta\varphi_{12}$, атрымаем

$$E = \frac{U_{12}}{d}. \qquad (17.2)$$

На падставе формулы (17.2) уводзяць адзінку напружанасці СІ вольт на метр $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$. $1\,\frac{\text{В}}{\text{м}}$ — модуль напружанасці такога аднароднага электрастатычнага поля, у якім напружанне паміж двума пунктамі, што знаходзяцца на адной і той жа лініі напружанасці на адлегласці 1 м, складае 1 В.

Выкарыстоўваючы тэрмін «напружанне», на практыцы пункты *1* і *2* поля выбіраюць так, каб $U_{12} > 0$.

1. Работа, якую выконваюць сілы электрастатычнага поля пры перамяшчэнні пробнага зараду з пачатковага пункта *1* у канцавы пункт *2*, роўная здабытку значэння зараду і рознасці патэнцыялаў (напружання) паміж гэтымі двума пунктамі поля:

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 U_{12}.$$

2. Модуль напружанасці аднароднага электрастатычнага поля і рознасць патэнцыялаў (напружанне) пры ўмове, што $U_{12} > 0$, звязаны паміж сабой суадносінай

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U_{12}}{d}.$$

1. Што называюць рознасцю патэнцыялаў?

2. Як рознасць патэнцыялаў паміж двума пунктамі поля залежыць ад работы сіл электрастатычнага поля?

3. У якіх адзінках вымяраюць рознасць патэнцыялаў?

4. Як звязана напружанне з напружанасцю аднароднага электрастатычнага поля?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. У цэнтры сферы з раўнамерна размеркаваным дадатным зарадам $q_1 = 36$ нКл знаходзіцца маленькі шарык з адмоўным зарадам, модуль якога $|q_2| = 16$ нКл. Вызначце патэнцыял электрастатычнага поля ў пункце, які знаходзіцца па-за сферай на адлегласці $r = 10$ м ад яе цэнтра.

Дадзена:
$q_1 = 36$ нКл $= 3{,}6 \cdot 10^{-8}$ Кл
$q_2 = -16$ нКл $= -1{,}6 \cdot 10^{-8}$ Кл
$r = 10$ м

φ — ?

Рашэнне. Патэнцыял у дадзеным пункце поля вызначым паводле прынцыпу суперпазіцыі: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, дзе $\varphi_1 > 0$ — патэнцыял электрастатычнага поля дадатна зараджанай сферы, а $\varphi_2 < 0$ — патэнцыял электрастатычнага поля адмоўна зараджанага шарыка.

Паколькі $\varphi_1 = k\frac{q_1}{r}$, $\varphi_2 = k\frac{q_2}{r}$, то $\varphi = k\frac{q_1}{r} + k\frac{q_2}{r} = \frac{k}{r}(q_1 + q_2)$.

$$\varphi = \frac{9{,}0 \cdot 10^9 \ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}{10\ \text{м}} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-8}\ \text{Кл} = 18\ \text{В}.$$

Адказ: $\varphi = 18$ В.

Прыклад 2. Электрон, які рухаецца ўздоўж лініі напружанасці электрастатычнага поля, у пункце поля з патэнцыялам $\varphi_1 = 0{,}90$ В мае скорасць, модуль якой $v_1 = 3{,}0 \cdot 10^5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Вызначце патэнцыял пункта поля, з якога электрон пачынае рухацца ў адваротным напрамку. Маса электрона $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Дадзена:
$\varphi_1 = 0{,}90$ В
$v_1 = 3{,}0 \cdot 10^5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$
$v_2 = 0{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$
$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг
$e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл
φ_2 — ?

Рашэнне. Пры руху электрона сілы поля выконваюць работу $A = e(\varphi_1 - \varphi_2)$. Гэтая работа роўная прырашчэнню (змяненню) кінетычнай энергіі электрона: $\frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2} = e(\varphi_1 - \varphi_2)$. З улікам таго, што скорасць руху электрона зменшылася да нуля, атрымаем: $-\frac{m_e v_1^2}{2} = e(\varphi_1 - \varphi_2)$, адкуль $\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{m_e v_1^2}{2e} = \varphi_1 - \frac{m_e v_1^2}{2|e|}$.

$$\varphi_2 = 0{,}90\,\text{В} - \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{кг} \cdot 9{,}0 \cdot 10^{10}\ \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}} = 0{,}64\ \text{В}.$$

Адказ: $\varphi_2 = 0{,}64$ В.

Практыкаванне 15

1. Сілы электрастатычнага поля выконваюць работу $A = 1{,}0$ мкДж, перамяшчаючы зараджаную часціцу з пункта з патэнцыялам $\varphi_1 = 100$ В у пункт з патэнцыялам $\varphi_2 = 75$ В. Вызначце значэнне электрычнага зараду часціцы.

2. Напружанне паміж двума пунктамі, якія знаходзяцца на адной лініі напружанасці аднароднага электрастатычнага поля на адлегласці $r_1 = 1{,}5$ см адзін ад аднаго, $U_{12} = 18$ В. Вызначце напружанне паміж двума пунктамі, размешчанымі на гэтай жа лініі напружанасці на адлегласці $r_2 = 20$ см адзін ад аднаго.

3. Каб у паветры пры атмасферным ціску праскочыла іскра, у ім павінна быць электрастатычнае поле, модуль напружанасці якога не менш чым $E = 3{,}00\ \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$. Вызначце рознасць патэнцыялаў паміж воблакам і паверхняй Зямлі падчас навальніцы, калі даўжыня «іскры» — маланкі — $d = 480$ м.

4. Напружанне паміж двума пунктамі, размешчанымі на адной лініі напружанасці аднароднага электрастатычнага поля, $U = 4{,}8$ кВ. Вызначце модуль напружанасці поля, калі адлегласць паміж пунктамі $d = 12$ см.

5. Пылінка масай $m = 4{,}0 \cdot 10^{-9}$ кг знаходзіцца ва ўзважаным стане паміж рознаіменна зараджанымі гарызантальнымі пласцінамі. Напружанне паміж пласцінамі $U = 12$ В, адлегласць паміж імі $d = 4{,}0$ см. Вызначце электрычны зарад пылінкі.

6. Электрон са стану спакою паскараецца ў электрастатычным полі, рухаючыся з пункта *1* у пункт *2*, напружанне паміж якімі $U_{12} = 20$ В. Вызначце модуль скорасці электрона ў пункце *2*. Маса электрона $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

7. У вяршынях раўнабедранага прамавугольнага трохвугольніка знаходзяцца пунктавыя зарады $q_1 = 1{,}2$ нКл, $q_2 = 2{,}4$ нКл, $q_3 = 3{,}0$ нКл. Вызначце патэнцыял электрастатычнага поля гэтых зарадаў у пункце, які знаходзіцца на сярэдзіне гіпатэнузы даўжынёй $a = 18$ см.

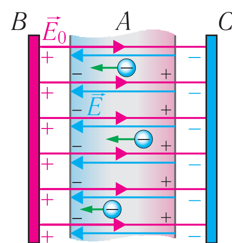
8*. Два маленькія шарыкі, электрычныя зарады якіх $q_1 = 3{,}2$ нКл і $q_2 = 7{,}2$ нКл, знаходзяцца на адлегласці $r_1 = 40$ см адзін ад аднаго. Вызначце мінімальнае значэнне работы, якую трэба выканаць, каб зблізіць шарыкі да адлегласці $r_2 = 25$ см.

§ 18. Праваднікі ў электрастатычным полі

Мы ўжо абмяркоўвалі падабенства і адрозненне гравітацыйнага і электрастатычнага ўзаемадзеянняў. Трэба адзначыць яшчэ адно іх істотнае адрозненне. Ад сіл прыцягнення нельга засцерагчыся. Няма такога месца, у якім сілы прыцягнення не дзейнічалі б. А вось атрымаць надзейную ахову ад электрастатычных сіл увогуле магчыма. Такую ахову можа забяспечыць любы праваднік. Якія ж уласцівасці праваднікоў дазваляюць выкарыстоўваць іх для электрастатычнай аховы?

Праваднікі ў электрастатычным полі. У металах свабоднымі зараджанымі часціцамі з'яўляюцца электроны. Гэта адбываецца таму, што электроны, якія знаходзяцца на знешніх абалонках атамаў, страчваюць сувязі са сваімі атамамі і могуць адносна свабодна перамяшчацца па ўсім аб'ёме металу.

Высветлім, што адбываецца ў аднародным металічным праваднiку, калі яго ўнесці ў электрастатычнае поле. Для гэтага змесцім металічны праваднік *A* у электрастатычнае поле, створанае дзвюма зараджанымі пласці-



Рыс. 99

намі B і C (рыс. 99). Напружанасць $\vec{E}_0$ гэтага поля накіравана ад дадатна зараджанай пласціны B да адмоўна зараджанай пласціны C. Пад дзеяннем электрычных сіл свабодныя электроны нараўне з бесперапынным цеплавым рухам пачнуць рухацца ўпарадкавана. Яны будуць збірацца злева каля паверхні правадніка A, ствараючы там залішні адмоўны зарад. Недахоп электронаў на правым баку правадніка прывядзе да ўзнікнення на ім залішняга дадатнага зараду.

Перамеркаваныя зарады ствараюць уласнае электрастатычнае поле $\vec{E}$. Лініі напружанасці гэтага поля ў праваднікy накіраваны ў бок, супрацьлеглы лініям напружанасці знешняга поля $\vec{E}_0$. Упарадкаванае перамяшчэнне свабодных электронаў у праваднікy спыніцца, калі ўласнае поле $\vec{E}$ скампенсуе знешняе $\vec{E}_0$. У гэтым выпадку напружанасць выніковага поля ўнутры правадніка стане роўнай нулю, г. зн. электрастатычнае поле ў праваднікy знікне.

Такім чынам, *электрастатычнае поле ўнутры правадніка адсутнічае*. Сумарны зарад любой унутранай часткі правадніка роўны нулю і не ўплывае на размеркаванне зарадаў на яго паверхні і на напружанасць поля ўнутры правадніка. На гэтай уласцівасці праваднікоў заснавана *электрастатычная ахова*. Каб абараніць адчувальныя да электрычнага поля прыборы, іх змяшчаюць унутр заземленых полых праваднікоў з суцэльнымі або сеткаватымі сценкамі. Часцей, аднак, экрануюць не прыборы, а саму крыніцу электрычнага поля, ад нежаданага ўздзеяння якога неабходна абараніць размешчаныя паблізу прылады.

Вынікам таго, што напружанасць электрастатычнага поля ўнутры аднароднага правадніка роўная нулю, з'яўляецца тое, што патэнцыял усіх пунктаў правадніка аднолькавы. На самай справе, калі напружанасць поля роўная нулю, то рознасць патэнцыялаў паміж любымі двума пунктамі правадніка роўная нулю. Таму можна гаварыць пра патэнцыял правадніка, не паказваючы канкрэтны пункт, у якім ён вызначаны.

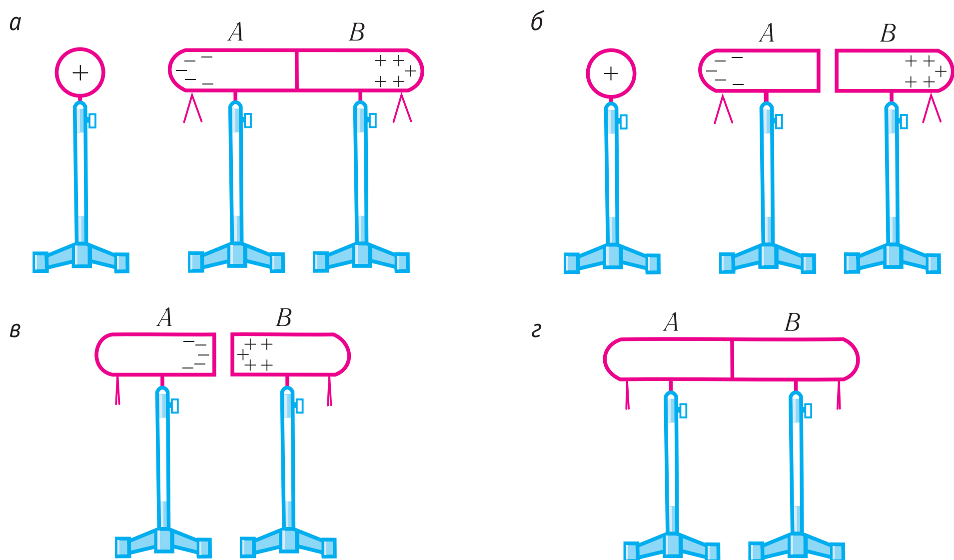
Электрастатычная індукцыя. У адпаведнасці з законам захавання электрычнага зараду модулі лішніх зарадаў, якія ўзнікаюць на супрацьлеглых паверхнях першапачаткова незараджанага правадніка пры ўнясенні яго ў электрастатычнае поле, павінны быць роўнымі. Праверым гэта падчас доследу.

Замацуем на неправодных стрыжнях два шчыльна прылеглыя металічныя цыліндры A і B з прымацаванымі да іх лісткамі тонкай паперы. Змесцім цыліндры ў электрастатычнае поле дадатна зараджанага шара (рыс. 100, *а*). Лісткі паперы разыдуцца, што сведчыць пра з’яўленне зарадаў на цыліндрах. Свабодныя электроны пад дзеяннем поля, створанага зарадам шара, перамесцяцца з цыліндра B на цыліндр A, зарадзіўшы яго адмоўна. Цыліндр B з-за недахопу электронаў стане дадатка зараджаным.

З’яву, пры якой на паверхні праваднiка (у дадзеным выпадку на паверхні злучаных цыліндраў), змешчанага ў электрастатычнае поле, з’яўляюцца электрычныя зарады, называюць *электрастатычнай індукцыяй* або *электрызацыяй праз уплыў*. Электрычныя зарады, якія ўзнікаюць у выніку электрастатычнай індукцыі, называюць *індуцыраванымі*.

Калі зараджаны шар прыбраць, то вугал разыходжання лісткоў паперы зменшыцца да нуля. Гэта тлумачыцца тым, што ў адсутнасці электрастатычнага поля, створанага зарадам шара, электроны раўнамерна размяркоўваюцца па ўсім аб’ёме абодвух цыліндраў.

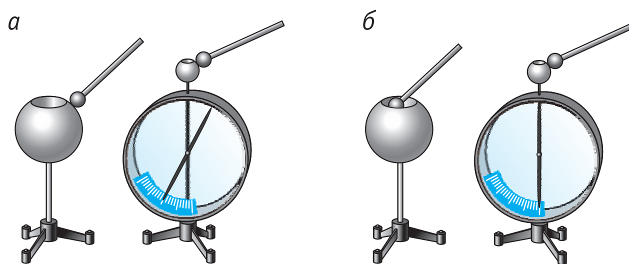
Пры раз’яднанні цыліндраў у полі зараджанага шара на іх застануцца супрацьлеглыя па знаку зарады (рыс. 100, *б*), модулі якіх роўныя. Гэтыя зарады



Рыс. 100

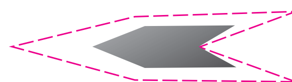
захаваюцца і ў тым выпадку, калі зараджаны шар, які стварае поле, прыбраць (рыс. 100, *в*). Толькі ў гэтым выпадку зарады будуць каля суседніх асноў цыліндраў. У тым, што модулі зарадаў абодвух цыліндраў роўныя, можна пераканацца, злучыўшы іх (рыс. 100, *г*): вугал паміж лісткамі стане роўны нулю.

Размеркаванне зарадаў у праваднiку. Высветлім, як размяркоўваюцца зарады ў наэлектрызаваным праваднiку. Правядзём дослед. Нададзім праваднiку электрычны зарад. Маленькім шарыкам на ізалявальнай ручцы будзем дакранацца да розных пунктаў на знешняй паверхні зараджанага полага металічнага шара, а потым электрометра (рыс. 101, *а*). Адзначаючы кожны раз вугал адхілення стрэлкі электрометра, можна пераканацца, што на знешняй паверхні шара зарад размяркоўваецца раўнамерна. Калі ж дакрануцца маленькім шарыкам да ўнутранай паверхні зараджанага полага шара, а потым да электрометра, то стрэлка электрометра не адхіліцца (рыс. 101, *б*). Значыць, на ўнутранай паверхні шара залішняга зараду няма, г. зн. зарады, нададзеныя праваднiку, размяшчаюцца на яго знешняй паверхні.



Рыс. 101

Зарадзім праваднік стрэлападобнай формы дадатным зарадам. Найбольшы зарад, які прыпадае на невялікія ўчасткі паверхні аднолькавай плошчы, знаходзіцца на выпукласцях праваднiка, асабліва на вострых выступах. На рысунку 102 штрыхавой лініяй для нагляднасці паказана размеркаванне модуля напружанасці поля каля паверхні зараджанага праваднiка стрэлападобнай формы. Напружанасць электрастатычнага поля паблізу вострых выступаў зараджанага праваднiка можа быць настолькі вялікай, што пачнецца іанізацыя малекул газаў, якія ўваходзяць у склад паветра, у выніку чаго з'явяцца дадатныя і адмоўныя іоны і



Рыс. 102

электроны. Зараджаныя часціцы з тым жа знакам зараду, што і на вастрыі, рухаюцца ад яго, зацягваючы нейтральныя малекулы. З прычыны гэтага ўзнікае накіраваны рух паветра каля вастрыя, або, як гавораць, «электрычны вецер». Яго можна выявіць, калі паднесці да вастрыя запаленую свечку: яе полымя адхіліцца ў бок ад вастрыя і нават можа патухнуць.

З'яву сцякання зарадаў з завостраных праваднікоў трэба ўлічваць у тэхніцы. Для прадухілення сцякання зарадаў ва ўсіх прыборах і механізмах, якія выкарыстоўваюцца ў высокавольтных сістэмах, металічныя часткі робяць закругленымі, а канцы металічных стрыжняў забяспечваюць гладкімі наканечнікамі.

1. Праваднік — адна з мадэлей, якую выкарыстоўваюць у электрастатыцы для апісання аднароднага цела, унутры якога напружанасць электрастатычнага поля ўсюды роўная нулю.

2. З'яву, пры якой на паверхні правадніка, змешчанага ў электрастатычнае поле, з'яўляюцца электрычныя зарады, называюць электрастатычнай індукцыяй або электрызацыяй праз уплыў.

3. Патэнцыялы ўсіх пунктаў на паверхні і ўнутры аднароднага правадніка, змешчанага ў электрастатычнае поле, аднолькавыя.

4. Зарады, нададзеныя праваднiку, размяшчаюцца на яго знешняй паверхні.

1. Што адбываецца ў аднародным металічным праваднiку пры ўнясенні яго ў электрастатычнае поле?

2. На якой уласцівасці праваднікоў заснавана электрастатычная ахова?

3. У чым заключаецца з'ява электрастатычнай індукцыі?

4. Растлумачце доследы з двума металічнымі цыліндрамі, змешчанымі ў электрастатычнае поле (гл. рыс. 100).

5. Чаму роўная сіла, якая дзейнічае на пунктавы зарад, калі яго змясціць у цэнтр раўнамерна зараджанай сферы? у любы іншы пункт унутры гэтай сферы?

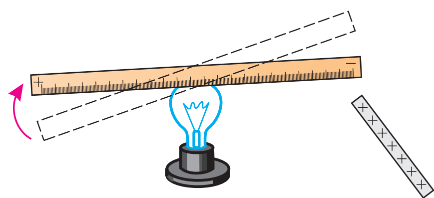
§ 19. Дыэлектрыкі ў электрастатычным полі

Даследуючы з'яву электрызацыі праз уплыў, англійскі фізік Стэфан Грэй (1670—1736) вызначыў у 1729 г., што рэчывы можна падзяліць на два класы: здольныя пераносіць электрычныя зарады і тыя, што гэтай уласцівасцю не валодаюць. Адпаведныя тэрміны «праваднік» і «ізаля-

тар» былі ўведзены ў 1742 г. англічанінам Жанам Тэафілам Дзезагюлье (1683—1744). Прыкладамі добрых дыэлектрыкаў з'яўляюцца янтар, шкло, эбаніт, гума, шоўк, пластмаса, слюда, фарфор. Што адбываецца ў дыэлектрыку, змешчаным у электрастатычнае поле?

Дыэлектрыкі. Тэрмін «дыэлектрык» увёў Фарадэй у 1838 г. для абазначэння рэчываў, у якія пранікае электрастатычнае поле («дыэлектрык» ад грэч. *dia* — праз, скрозь і англ. *electric* — электрычны). У дыэлектрыку ўсе электроны звязаны з ядрамі атамаў. Электрычнае поле не «адрывае» іх ад атамаў, а толькі злёгку зрушвае адносна дадатна зараджаных ядраў. Дыэлектрык змяшчае толькі *звязаныя зарады*, г. зн. зарады, якія ўваходзяць у склад атамаў (малекул) дыэлектрыка і пазбаўленыя магчымасці свабодна перамяшчацца пад дзеяннем электрычнага поля.

Высветлім, што адбываецца ў дыэлектрыку, змешчаным у электрастатычнае поле.

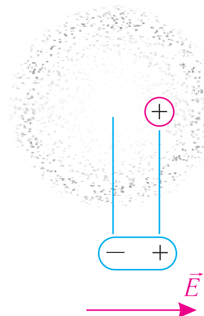


Рыс. 103

Правядзём дослед. Доўгую драўляную лінейку размесцім на падстаўцы так, каб яна магла свабодна круціцца (рыс. 103). Наэлектрызуем шкляную (або эбанітавую) палачку і паднясём яе да аднаго з канцоў лінейкі. Лінейка пачне паварочвацца. Такім чынам, незараджаны дыэлектрык, якім з'яўляецца драўляная лінейка, прыцягваецца да зараджанага цела.

Падобныя паводзіны дыэлектрыка магчымы толькі пры ўмове з'яўлення на яго канцах лішніх зарадаў, супрацьлеглых па знаку.

Палярызацыя дыэлектрыка. Які ж механізм пераразмеркавання зарадаў па паверхні дыэлектрыка? Дзеянне электрастатычнага поля з напружнасцю $\vec{E}$, у якое змешчаны дыэлектрык, зводзіцца да пераразмеркавання электронаў у аб'ёме кожнага атама дыэлектрыка. У выніку цэнтр электрычнага зараду электроннай абалонкі атама перамяшчаецца адносна цэнтра дадатнага зараду ядра атама. У цэлым нейтральная малекула ператвараецца ў электрычны дыполь (*ды* — два, *поль* — полюс) (рыс. 104). Разгледжаная з'ява атрымала назву *электроннай палярызацыі*. Механізм электроннай палярызацыі

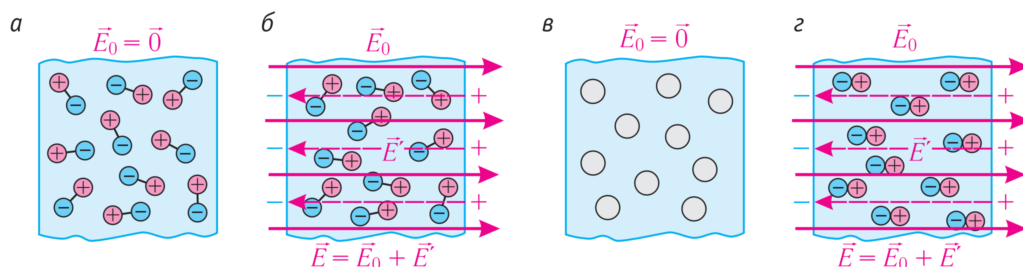


Рыс. 104

ўніверсальны, паколькі выяўляецца ў атамах, малекулах або іонах любога дыэлектрыка.

Калі дыэлектрыкі складаюцца з малекул, якія з'яўляюцца электрычнымі дыполямі ва ўмовах адсутнасці знешняга поля, то іх называюць палярнымі (вада, аміяк, эфір, ацэтон і інш.). У палярных дыэлектрыкаў пры адсутнасці знешняга электрастатычнага поля малекулы-дыполі, здзяйсняючы цеплавы рух, размяшчаюцца хаатычна (рыс. 105, *а*). Выніковае электрычнае поле, якое ствараецца малекуламі-дыполямі, практычна роўнае нулю.

Пад уздзеяннем знешняга электрастатычнага поля малекулы-дыполі імкнуцца павярнуцца так, каб іх восі супалі з напрамкам напружанасці знешняга поля (рыс. 105, *б*). Калі напрамак напружанасці поля перпендыкулярны паверхням, што абмяжоўваюць дыэлектрык, то адна з гэтых паверхняў аказваецца зараджанай адмоўна, а другая — дадатна.



Рыс. 105

У непалярных дыэлектрыкаў (парафін, бензол, азот і інш.) малекулы са сферычна сіметрычным размеркаваннем зарадаў пры адсутнасці знешняга электрычнага поля не ствараюць і ўласнага поля (рыс. 105, *в*). Пад уплывам электрастатычнага поля, як ужо было сказана, дадатныя і адмоўныя зарады ў межах малекулы некалькі зрушваюцца адзін адносна аднаго, утвараючы дыполь. Таму, як і ў выпадку з палярнымі дыэлектрыкамі, у непалярных дыэлектрыках на адной паверхні з'яўляецца дадатны палярызацыйны зарад, на другой — адмоўны (рыс. 105, *г*).

У адрозненне ад свабодных зарадаў праваднікa палярызацыйныя зарады ў дыэлектрыку не перамяшчаюцца, таму іх і называюць звязанымі. Гэтыя зарады нельга аддзяліць адзін ад аднаго. Так, калі палярызаваны дыэлектрык разрэзаць папалам у знешнім электрычным полі, то на адным баку кожнай палавінкі будзе нескампенсаваны дадатны зарад, а на другім — адмоўны.

Электрычнае поле ўнутры дыэлектрыка. Палярызацыйныя зарады (гл. рыс. 105 *б, г*) ствараюць уласнае электрастатычнае поле, напружанасць $\vec{E}'$ якога накіравана насустрач напружанасці $\vec{E}_0$ знешняга поля і аслабляе яе, але не кампенсуе цалкам.

Згодна з прынцыпам суперпазіцыі модуль напружанасці E выніковага электрастатычнага поля ўнутры дыэлектрыка $E = E_0 - E' < E_0$.

Для характарыстыкі электрычных уласцівасцей дыэлектрыкаў уводзяць фізічную велічыню, названую дыэлектрычнай пранікальнасцю рэчыва.

Дыэлектрычная пранікальнасць рэчыва ε — фізічная скалярная велічыня, якая паказвае, у колькі разоў модуль напружанасці $|\vec{E}|$ электрастатычнага поля ўнутры аднароднага дыэлектрыка меншы за модуль напружанасці $|\vec{E}_0|$ поля ў вакууме:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Калі пунктавыя нерухомыя зарады q_1 і q_2 знаходзяцца ў аднародным неабмежаваным дыэлектрыку, то модуль сіл іх электрастатычнага ўзаемадзеяння вызначаюць па формуле

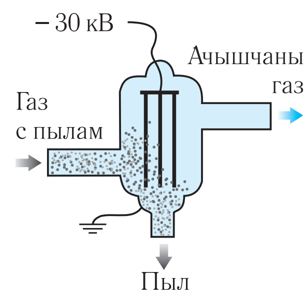
$$F = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon r^2}.$$

Розныя дыэлектрыкі палярызуюцца знешнім полем па-рознаму і маюць розную дыэлектрычную пранікальнасць. Так, дыэлектрычная пранікальнасць дыстыляванай вады пры тэмпературы 25 °C роўная 78,54, лёду пры тэмпературы -10° C — 95, а шкла — ад 4 да 16 у залежнасці ад яго гатунку. Дыэлектрычную пранікальнасць паветра, роўную 1,0006, пры рашэнні задач акругляюць да 1.

! Палярызацыю часціц у моцным электрастатычным полі выкарыстоўваюць у электрычных фільтрах для ачысткі дыму ад цвёрдых прадуктаў згарання паліва, якія забруджваюць тэрыторыю вакол цеплавых электрастанцый і буйных прадпрыемстваў (рыс. 106). Для гэтага ў дымаходах устанаўліваюць праваднікі спецыяльнай формы, якім надаюць пэўны электрычны зарад.

Рыс. 106

Электрафільтры ўстанаўліваюць на хімічных заводах, у цэхах, якія вырабляюць цэмент, і іншых аналагічных вытворчасцях. Палярызаваныя часціцы разнастайнага пылу прыцягваюцца да вертыкальных электродаў (рыс. 107). Калі модуль сілы цяжару, якая дзейнічае на часціцы, што затрымліваюцца фільтрам, дасягае пэўнага значэння, пыл асядае на дно фільтра. Для ачысткі фільтра пыл з яго перыядычна выдаляюць.



Рыс. 107

1. Дыэлектрык — адна з мадэлей, якую выкарыстоўваюць у электрастатыцы для апісання такога рэчыва, што ўнутры цел з гэтага рэчыва напружанасць электрастатычнага поля адрозніваецца ад нуля.

2. З'яву пераразмеркавання электрычных зарадаў у дыэлектрыку пры ўнясенні яго ў электрастатычнае поле называюць палярызацыяй.

3. Дыэлектрычная пранікальнасць рэчыва — фізічная скалярная велічыня, якая паказвае, у колькі разоў модуль напружанасці электрастатычнага поля ўнутры аднароднага дыэлектрыка меншы за модуль напружанасці таго ж поля ў вакууме:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

1. Якія зарады называюць звязанымі?

2. На якія два тыпы падзяляюць дыэлектрыкі ў залежнасці ад прасторавага размеркавання зарадаў у іх малекулах?

3. Што называюць палярызацыяй дыэлектрыка?

4. Які механізм палярызацыі палярных і непалярных дыэлектрыкаў?

5. Ці існуе поле ўнутры дыэлектрыка, які знаходзіцца ў знешнім электрастатычным полі?

6. Што называюць дыэлектрычнай пранікальнасцю рэчыва?

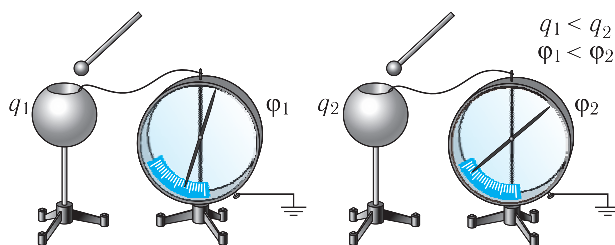
§ 20. Электраёмістасць. Кандэнсатары. Электраёмістасць плоскага кандэнсатара

Праваднікі і сістэмы, якія складаюцца з некалькіх праваднікоў, валодаюць уласцівасцю назапашваць электрычны зарад. У многіх электратэхнічных і радыётэхнічных устройствах выкарыстоўваюць прыборы, здольныя пры малых памерах назапашваць дастаткова вялікі электрычны зарад. Высветлім, як гэта можна ажыццявіць.

Электрычная ёмістасць. Для характарыстыкі ўласцівасці правадніка назапашваюць электрычны зарад увялі фізічную велічыню — электрычную ёмістасць. Для тлумачэння фізічнага сэнсу гэтай велічыні разгледзім наступны дослед: далучым тонкім доўгім правадніком да стрыжня электрометра з заземленым корпусам адасоблены полы металічны шар.

Праваднік лічаць адасобленым, калі ён размешчаны воддаль ад магчымых крыніц электрычнага поля як праводных, так і неправодных цел. Калі паблізу зараджанага правадніка знаходзяцца іншыя целы, то ў выніку з'явы электрастатычнай індукцыі ў праводніках адбываецца пераразмеркаванне свабодных электрычных зарадаў, а ў дыэлектрыках — зрушэнне ў супрацьлеглыя бакі рознаіменных зарадаў, што ўваходзяць у склад атамаў і малекул рэчыва, якое прыводзіць да ўзнікнення палярызацыйных зарадаў. Палярызацыйныя зарады, што ўзнікаюць у дыэлектрыках, і зарады, што індуцыруюцца на праваднiках, ствараюць дадатковае электрастатычнае поле, якое змяняе патэнцыял зараджанага правадніка.

Дакранаючыся наэлектрызаваным праводным шарыкам, які замацаваны на ізалявальнай ручцы, да ўнутранай паверхні полага металічнага шара, будзем паслядоўна надаваць яму аднолькавыя электрычныя зарады, павялічваючы яго сумарны зарад у 2, 3 і г. д. разоў (рыс. 108). Чым большы электрычны зарад нададзены шару, тым большым стане яго патэнцыял, паколькі



Рыс. 108

$\varphi = k\dfrac{q}{R}$, дзе R — радыус шара. Значыць, у колькі разоў павялічыўся зарад шара, адпаведна ў столькі ж разоў павялічыўся і яго патэнцыял, а адносіна электрычнага зараду да патэнцыялу застаецца велічынёй пастаяннай для дадзенага шара: $\dfrac{q_1}{\varphi_1} = \dfrac{q_2}{\varphi_2} = \dfrac{q_3}{\varphi_3} = ... = \dfrac{q_n}{\varphi_n} = \text{const}$.

Прамая прапарцыянальная залежнасць паміж патэнцыялам і электрычным зарадам уласціва не толькі шарападобным праваднікам, але і любым адасобленым праваднікам адвольнай формы. Неабходна толькі, каб форма і памеры правадніка, а таксама дыэлектрычныя ўласцівасці асяроддзя, у якім ён знаходзіцца, заставаліся нязменнымі.

Электрычная ёмістасць *C* адасобленага правадніка — фізічная скалярная велічыня, якая колькасна характарызуе ўласцівасць правадніка назапашваць электрычны зарад і роўная адносіне зараду *q* правадніка да яго патэнцыялу φ:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Звяртаем вашу ўвагу, што электрычная ёмістасць з'яўляецца характарыстыкай правадніка і не залежыць ні ад яго зараду, ні ад патэнцыялу. Паколькі зарады размяшчаюцца толькі на знешняй паверхні правадніка, то ні ад рэчыва, з якога ён выраблены, ні ад яго масы электраёмістасць правадніка таксама не залежыць. Яна залежыць толькі ад формы і памераў правадніка, а таксама ад дыэлектрычнай пранікальнасці асяроддзя, у якім гэты праваднік знаходзіцца.

Адзінку электрычнай ёмістасці ў СІ называюць фарад (Ф).

1 Ф — электраёмістасць такога адасобленага правадніка, якому для павышэння патэнцыялу на 1 В неабходна надаць зарад 1 Кл:

$$1\ \text{Ф} = \frac{1\ \text{Кл}}{1\ \text{В}}.$$

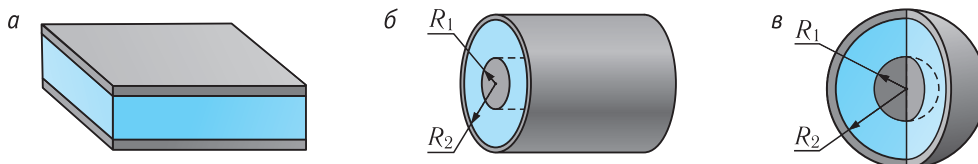
1 Ф — вельмі вялікая электраёмістасць. Напрыклад, у вакууме электраёмістасцю $C = 1$ Ф валодаў бы адасоблены шар радыусам $R = 9 \cdot 10^9$ м (для параўнання: радыус зямнога шара $R_З = 6{,}4 \cdot 10^6$ м). Таму на практыцы прымяняюць дольныя адзінкі: мікрафарад ($1\,\text{мкФ} = 1 \cdot 10^{-6}$ Ф), нанафарад ($1\ \text{нФ} = 1 \cdot 10^{-9}$ Ф) і пікафарад ($1\ \text{пФ} = 1 \cdot 10^{-12}$ Ф).

Напрыклад, электраёмістасць такога вялікага правадніка, як зямны шар, роўная $C = 0{,}71$ мФ, а электраёмістасць чалавечага цела прыкладна $C = 50$ пФ.

! Электраёмістасць адасобленага праводнага шара радыусам R, які знаходзіцца ў неабмежаваным асяроддзі з дыэлектрычнай пранікальнасцю ε, вызначаюць па формуле $C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R$. Гэты выраз можна атрымаць у выніку матэматычных пераўтварэнняў дзвюх формул: для знаходжання электраёмістасці $C = \frac{q}{\varphi}$ і патэнцыялу зараджанага шара $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R}$.

Кандэнсатары. Для атрымання патрэбных значэнняў электраёмістасці выкарыстоўваюць *кандэнсатар* — сістэму, якая складаецца з двух або большай колькасці праваднікоў і здольная назапашваць і аддаваць (пераразмяркоўваць) электрычныя зарады. Кандэнсатар — ад лац. *condensare* — ушчыльняць, згушчаць.

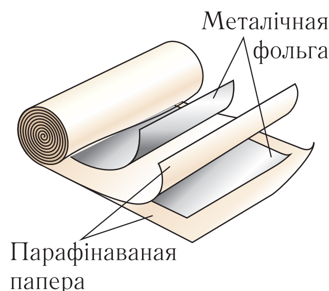
Каб на электраёмістасць кандэнсатара не аказвалі ўплыў целы вакол яго, праваднікам, якія ўтвараюць кандэнсатар, надаюць такую форму, пры якой поле, створанае зарадамі гэтых праваднікоў, засяроджана паміж імі. Гэтую ўмову задавальняюць дзве блізка размешчаныя пласціны (плоскі кандэнсатар) (рыс. 109, *а*), два кааксіяльныя цыліндры (цыліндрычны кандэнсатар) (рыс. 109, *б*), дзве канцэнтрычныя сферы (сферычны кандэнсатар) (рыс. 109, *в*).



Рыс. 109

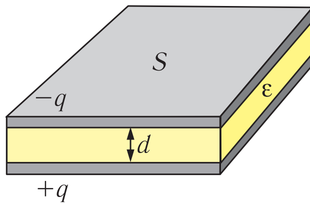
! Шырока распаўсюджаны тып кандэнсатараў уяўляе сабой дзве стужкі металічнай фольгі, падзеленыя тонкай парафінаванай паперай, полістыролам, слюдой або іншым дыэлектрыкам, якія скручаны ў тугую спіраль і запаяны (рыс. 110).

Выкарыстоўваюць і так званыя паветраныя кандэнсатары, у якіх ізалявальным слоем, што аддзяляе праваднікі, з'яўляецца паветра.



Рыс. 110

Самы просты кандэнсатар — сістэма, якая складаецца з двух праваднікоў, падзеленых слоем



Рыс. 111

дыэлектрыка, таўшчыня якога малая ў параўнанні з памерамі праваднікоў (рыс. 111). Праваднікі, якія ўтвараюць кандэнсатар, называюць яго абкладкамі. На абкладках кандэнсатара назапашваюцца супрацьлеглыя па знаку электрычныя зарады, модулі якіх роўныя. Працэс назапашвання зарадаў на абкладках называюць зарадкай кандэнсатара. Працэс нейтралізацыі зарадаў пры злучэнні абкладак кандэнсатара праваднікам называюць разрадкай кандэнсатара. Модуль зараду, які знаходзіцца на адной з абкладак кандэнсатара, называюць зарадам кандэнсатара.

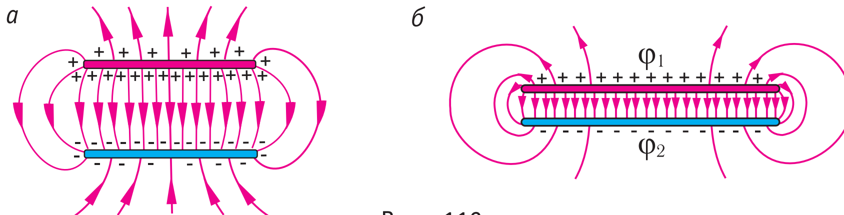
Уласцівасць кандэнсатара назапашваць і захоўваць на працягу доўгага часу электрычныя зарады характарызуюць яго электрычнай ёмістасцю.

Электрычнай ёмістасцю *C* кандэнсатара называюць фізічную скалярную велічыню, якая колькасна характарызуе здольнасць кандэнсатара назапашваць электрычныя зарады і роўная адносіне зараду *q* кандэнсатара да напружання *U* паміж яго абкладкамі:

$$C = \frac{q}{U}.$$

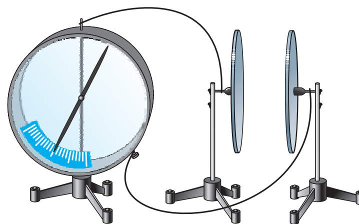
Электраёмістасць плоскага кандэнсатара. Калі абкладкамі кандэнсатара з'яўляюцца дзве аднолькавыя паралельныя адна адной пласціны, то кандэнсатар называюць *плоскім*. Электрастатычнае поле зараджанага плоскага кандэнсатара ў асноўным засяроджана паміж яго абкладкамі і з'яўляецца практычна аднародным (рыс. 112, *а*). Каля краёў пласцін аднароднасць поля парушаецца, аднак гэта часта не прымаюць пад увагу, калі адлегласць паміж пласцінамі значна меншая за іх памеры (рыс. 112, *б*).

Каб вызначыць, ад чаго залежыць электраёмістасць плоскага кандэнсатара, правядзём некалькі доследаў. У якасці абкладак кандэнсатара выкарыстаем дзве металічныя пласціны, размешчаныя ў паветры на некаторай адлегласці



Рыс. 112

паралельна адна адной. Злучым стрыжань электрометра з адной пласцінай, а яго корпус з другой (рыс. 113). Зарадзім кандэнсатар, падключыўшы яго да крыніцы пастаяннага току на некаторы прамежак часу. Калі паміж пласцінамі кандэнсатара ўзнікне напружанне (стрэлка электрометра адхіліцца), адключым яго ад крыніцы току.



Рыс. 113

Калі перамяшчаць пласціны адносна адна адной, памяншаючы плошчу іх узаемнага перакрыцця пры нязменнай адлегласці паміж імі, то паказанні электрометра пры гэтым павялічваюцца, нягледзячы на тое, што нададзены пласцінам пры зарадцы кандэнсатара зарад не змяняецца. Паколькі напружанне паміж пласцінамі павялічваецца пры змяншэнні плошчы перакрыцця пласцін кандэнсатара, яго электраёмістасць павінна памяншацца ($S\downarrow \Rightarrow C\downarrow$).

Павялічваючы адлегласць паміж пласцінамі кандэнсатара і не мяняючы плошчы іх перакрыцця, будзем назіраць узрастанне паказанняў электрометра, г. зн. павялічэнне напружання паміж пласцінамі кандэнсатара, што магчыма пры памяншэнні яго электраёмістасці. Значыць, чым большая адлегласць паміж пласцінамі кандэнсатара, тым меншая яго электраёмістасць ($d\uparrow \Rightarrow C\downarrow$).

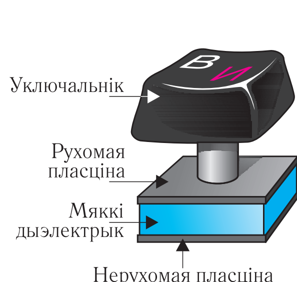
Калі паміж абкладкамі кандэнсатара змясціць пласціну з дыэлектрыка, напрыклад, са шкла, паказанні электрометра зменшацца. Напружанне паміж абкладкамі ў гэтым выпадку памяншаецца, значыць, электраёмістасць кандэнсатара павялічваецца ($\varepsilon\uparrow \Rightarrow C\uparrow$).

У СІ каэфіцыентам прапарцыянальнасці паміж электраёмістасцю кандэнсатара і велічынямі (S, d, ε) што яе вызначаюць, з'яўляецца электрычная пастаянная $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$.

Вынікі эксперыментаў дазваляюць запісаць формулу для вызначэння электраёмістасці плоскага кандэнсатара:

$$\boldsymbol{C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}},$$

дзе S — плошча адной з абкладак кандэнсатара, d — адлегласць паміж абкладкамі, ε — дыэлектрычная пранікальнасць асяроддзя, якое знаходзіцца паміж яго абкладкамі.



Рыс. 114

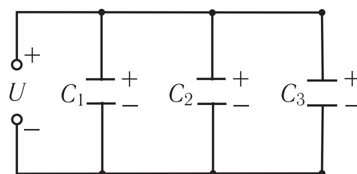
Рыс. 115

! Залежнасць электраёмістасці кандэнсатара ад адлегласці паміж яго пласцінамі выкарыстоўваюць у схемах кадзіравання інфармацыі з клавіятуры персанальнага камп'ютара. Пад кожнай клавішай знаходзіцца кандэнсатар, электраёмістасць якога змяняецца пры націсканні на клавішу. Мікрасхема, падключаная да кожнай клавішы, пры змяненні электраёмістасці выдае кадзіраваны сігнал, які адпавядае дадзенай літары (рыс. 114).

Умоўная выява кандэнсатара пастаяннай электраёмістасці на электрычных схемах паказана на рысунку 115.

! На схемах намінальную электраёмістасць кандэнсатараў звычайна падаюць у мікрафарадах і пікафарадах. Аднак рэальная электраёмістасць кандэнсатара можа значна змяняцца ў залежнасці ад шматлікіх фактараў. Яшчэ адной, не менш важнай характарыстыкай кандэнсатараў з'яўляецца намінальнае напружанне — значэнне напружання, пазначанае на кандэнсатары, пры якім яго можна выкарыстоўваць у зададзеных умовах на працягу тэрміну службы. Гэта напружанне можа знаходзіцца ў межах ад некалькіх вольт да некалькіх сотняў кілавольт. Намінальнае напружанне залежыць ад канструкцыі кандэнсатара і ўласцівасцей прыменены матэрыялаў. Для многіх тыпаў кандэнсатараў з павелічэннем тэмпературы дапушчальнае напружанне памяншаецца.

Для атрымання патрэбнай электраёмістасці кандэнсатары злучаюць у батарэі, выкарыстоўваючы іх паралельнае і паслядоўнае злучэнне. Пры паралельным злучэнні (рыс. 116) дадатна зараджаныя абкладкі кандэнсатараў злучаюць у адну групу, а адмоўна зараджаныя — у другую. Пры такім злучэнні напружанне на ўсіх кандэнсатарах аднолькавае, але іх зарады могуць быць рознымі.



Рыс. 116

! Пры *паралельным злучэнні* кандэнсатараў:

1) напружанне на полюсах батарэі кандэнсатараў роўнае напружанню на кожным кандэнсатары:

$$U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n;$$

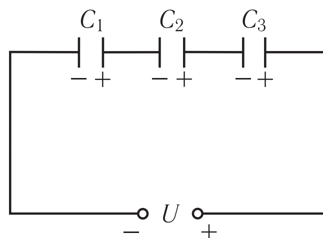
2) поўны зарад батарэі кандэнсатараў роўны суме зарадаў асобных кандэнсатараў:

$$q = q_1 + q_2 + \ldots + q_n;$$

3) электраёмістасць батарэі кандэнсатараў роўная суме электраёмістасці асобных кандэнсатараў:

$$C = C_1 + C_2 + \ldots + C_n.$$

Паралельнае злучэнне кандэнсатараў прымяняюць для атрымання вялікай электраёмістасці.



Рыс. 117

Пры паслядоўным злучэнні (рыс. 117) дадатна зараджаная абкладка папярэдняга кандэнсатара злучана з адмоўна зараджанай абкладкай наступнага. Пры такім злучэнні модулі зарадаў на ўсіх абкладках роўныя, а сумарны зарад злучаных адна з адной абкладак роўны нулю.

Пры *паслядоўным злучэнні* кандэнсатараў:

1) напружанне на полюсах батарэі кандэнсатараў роўнае суме напружанняў на ўсіх кандэнсатарах:

$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n;$$

2) зарад батарэі кандэнсатараў роўны зараду аднаго кандэнсатара:

$$q = q_1 = q_2 = \ldots = q_n;$$

3) велічыня, адваротная электраёмістасці батарэі, роўная суме велічынь, адваротных электраёмістасці асобных кандэнсатараў:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}.$$

1. Электрычная ёмістасць адасобленага праваднiка — фізічная скалярная велічыня, якая колькасна характарызуе здольнасць праваднiка назапашваць электрычны зарад і роўная адносіне зараду праваднiка да яго патэнцыялу:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

2. Электраёмістасць праваднiка залежыць толькі ад яго формы і памераў, а таксама ад дыэлектрычнай пранікальнасці асяроддзя, у якім гэты праваднік знаходзіцца.

3. Электрычнай ёмістасцю кандэнсатара называюць фізічную скалярную велічыню, якая колькасна характарызуе здольнасць кандэнсатара

назапашваць электрычныя зарады і роўная адносіне зараду кандэнсатара да напружання паміж яго абкладкамі:

$$C = \frac{q}{U}.$$

4. Электраёмістасць плоскага кандэнсатара залежыць ад плошчы абкладак, адлегласці паміж імі і дыэлектрычнай пранікальнасці асяроддзя паміж абкладкамі:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}.$$

?

1. Які праваднік можна лічыць адасобленым?
2. Што называюць электрычнай ёмістасцю адасобленага правадніка?
3. Ад чаго залежыць і ад чаго не залежыць электраёмістасць правадніка?
4. Ці ёсць электраёмістасць у незараджанага правадніка?
5. Якую сістэму праваднікоў называюць кандэнсатарам?
6. Што ўяўляе сабой плоскі кандэнсатар? Якое яго прызначэнне?
7. Які працэс называюць зарадкай кандэнсатара? разрадкай кандэнсатара?
8. Ад чаго залежыць электраёмістасць плоскага кандэнсатара?
9. Плоскі паветраны кандэнсатар далучаны да крыніцы пастаяннага току. Ці зменіцца зарад кандэнсатара і напружанне на ім, калі прастору паміж абкладкамі кандэнсатара запоўніць дыэлектрыкам?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Плоскаму кандэнсатару электраёмістасцю $C = 0{,}4$ мкФ нададзены электрычны зарад $q = 2$ нКл. Вызначце модуль напружанасці электрастатычнага поля паміж абкладкамі кандэнсатара, калі адлегласць паміж імі $d = 5$ мм.

Дадзена:
$C = 0{,}4$ мкФ $= 4 \cdot 10^{-7}$ Ф
$q = 2$ нКл $= 2 \cdot 10^{-9}$ Кл
$d = 5$ мм $= 5 \cdot 10^{-3}$ м

E — ?

Рашэнне. Модуль напружанасці аднароднага электрастатычнага поля вызначым па формуле $E = \frac{U}{d}$. Паколькі напружанне паміж абкладкамі кандэнсатара $U = \frac{q}{C}$, то $E = \frac{q}{Cd}$.

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-9}\ \text{Кл}}{4 \cdot 10^{-7}\ \text{Ф} \cdot 5 \cdot 10^{-3}\ \text{м}} = 1\ \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Адказ: $E = 1\ \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Прыклад 2. Прастора паміж абкладкамі плоскага кандэнсатара запоўнена дыэлектрыкам. Кандэнсатар зарадзілі да напружання $U_1 = 1$ кВ і адключылі ад крыніцы току. Вызначце дыэлектрычную пранікальнасць дыэлектрыка, калі пасля яго выдалення з кандэнсатара напружанне павялічылася да $U_2 = 3$ кВ.

Дадзена:
$U_1 = 1$ кВ $= 1 \cdot 10^3$ В
$U_2 = 3$ кВ $= 3 \cdot 10^3$ В
$\varepsilon_2 = 1$

ε_1 — ?

Рашэнне. У абодвух выпадках зарад кандэнсатара будзе аднолькавым $q_1 = q_2$, бо ён адключаны ад крыніцы току. Паколькі $q_1 = C_1U_1$, $q_2 = C_2U_2$, то $C_1U_1 = C_2U_2$ (1). Электраёмістасць плоскага кандэнсатара вызначаюць па формуле $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$. Для дадзеных выпадкаў электраёмістасці адпаведна роўныя: $C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{d}$, $C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S}{d}$ (2). Падставіўшы формулы (2) у роўнасць (1), атрымаем: $\varepsilon_1 U_1 = \varepsilon_2 U_2$, $\varepsilon_1 = \frac{U_2}{U_1}\varepsilon_2$, $\varepsilon_1 = \frac{3 \cdot 10^3\text{ В}}{1 \cdot 10^3\text{ В}} \cdot 1 = 3$.

Адказ: $\varepsilon_1 = 3$.

Практыкаванне 16

1. Вызначце электраёмістасць кандэнсатара, калі напружанне паміж яго абкладкамі $U = 20$ В, а яго зарад $q = 5{,}0 \cdot 10^{-4}$ Кл.

2. Электраёмістасць плоскага паветранага кандэнсатара $C = 54$ пФ. Вызначце адлегласць паміж яго абкладкамі, калі плошча кожнай з іх $S = 300$ см^2.

3. Вызначце, як зменіцца электраёмістасць плоскага кандэнсатара, калі плошчу кожнай з яго абкладак павялічыць у два разы, а адлегласць паміж імі паменшыць у тры разы.

4. Абкладкі плоскага кандэнсатара плошчай $S = 100$ см^2 кожная размешчаны на адлегласці $d = 2{,}0$ мм адна ад адной. Прастора паміж абкладкамі запоўнена слюдой, дыэлектрычная пранікальнасць якой $\varepsilon = 6{,}0$. Вызначце зарад кандэнсатара, калі напружанне паміж яго абкладкамі $U = 3{,}0$ кВ.

5. Вызначце модуль напружанасці электрастатычнага поля паміж абкладкамі плоскага паветранага кандэнсатара, калі нададзены яму зарад $q = 20$ нКл, а плошча кожнай з абкладак $S = 50$ см^2.

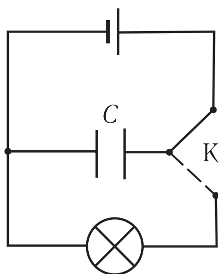
6. Модуль напружанасці электрастатычнага поля ў прасторы паміж абкладкамі плоскага кандэнсатара $E_1 = 2{,}1\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Не адключаючы кандэнсатар ад крыніцы току, адлегласць паміж яго абкладкамі зменшылі ў чатыры разы. Вызначце модуль напружанасці поля пасля збліжэння абкладак.

7. Кропля масай $m = 1{,}5$ г знаходзіцца ў раўнавазе паміж абкладкамі гарызантальна размешчанага плоскага кандэнсатара, зараджанага да напружання $U = 500$ В. Вызначце адлегласць паміж абкладкамі, калі зарад кроплі $q = 0{,}15$ мкКл.

8*. Абкладкі плоскага кандэнсатара плошчай $S = 200$ см^2 кожная размешчаны на адлегласці $d = 4{,}0$ мм адна ад адной. Прастора паміж імі запоўнена газай, дыэлектрычная пранікальнасць якой $\varepsilon = 2{,}0$. Вызначце модуль сіл прыцяжэння зарадаў абкладак, калі напружанне на кандэнсатары $U = 2{,}0$ кВ.

§ 21. Энергія электрастатычнага поля кандэнсатара

У працэсе электрызацыі цел знешнія сілы выконваюць работу па пераразмеркаванні зарадаў паміж целамі, пераадольваючы сілы кулонаўскага прыцяжэння падчас падзелу адмоўных і дадатных зарадаў. Але ўсякі падзел зарадаў прыводзіць да ўзнікнення электрастатычнага поля. Гэта азначае, што для стварэння электрастатычнага поля сістэмы зараджаных цел неабходна выканаць работу па перамяшчэнні зарадаў паміж гэтымі целамі. Калі ў якасці такіх цел разглядаць абкладкі кандэнсатара, то працэс яго зарадкі можна ўявіць як перанос зараду q з адной абкладкі на другую, у выніку чаго адна з іх набывае зарад $-q$, а другая — $+q$. Пры гэтым работа, выкананая знешнімі сіламі, роўная энергіі электрастатычнага поля зараджанага кандэнсатара.



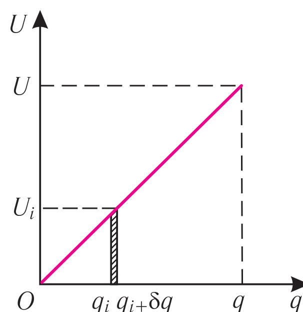
Рыс. 118

Пераканацца ў тым, што ў зараджанага кандэнсатара ёсць энергія, можна шляхам доследу. Збяром электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, кандэнсатара і электрычнай лямпы (рыс. 118). Зарадзім кандэнсатар, далучыўшы яго да крыніцы току. Затым, адключыўшы кандэнсатар ад крыніцы току, падключым яго да лямпы. Пры гэтым назіраем кароткачасовую ўспышку святла. У дадзеным выпадку падчас разрадкі кандэнсатара яго энергія ператвараецца ва ўнутраную энергію спіралі лямпы, частка гэтай энергіі расходуецца на выпраменьванне святла.

У час праходжання электрычнага току па ланцугу кандэнсатар зараджаўся, г. зн. на яго абкладках назапашваліся электрычныя зарады. Пры гэтым у

прасторы вакол кандэнсатара з’явілася электрастатычнае поле. Сумарны электрычны зарад абедзвюх абкладак кандэнсатара перад зарадкай, падчас зарадкі і пасля разрадкі роўны нулю. Адзінае змяненне, якое адбылося пры разрадцы кандэнсатара, заключаецца ў тым, што знікла электрастатычнае поле, якое стваралася зарадамі на абкладках кандэнсатара. Такім чынам, энергіяй валодала электрастатычнае поле, створанае зарадамі на абкладках зараджанага кандэнсатара.

Калі форма і памеры абкладак кандэнсатара, а таксама адлегласць паміж імі і дыэлектрычныя ўласцівасці асяроддзя, якое запаўняе прастору паміж абкладкамі, застаюцца нязменнымі, то напружанне на кандэнсатары прама прапарцыянальнае модулю зараду яго абкладак $U = \frac{1}{C}q$ (рыс. 119). Каб павялічыць модуль зараду на абкладках ад q_i да $q_i + \delta q$, знешняй сіле неабходна выканаць работу $\delta A_i = U_i \cdot \delta q$ па перамяшчэнні бясконца малой дадатнай порцыі зараду δq з адмоўнай абкладкі на дадатную. Гэтай рабоце на рысунку 119 адпавядае плошча заштрыхаванага слупка. Поўная ж работа A па зарадцы кандэнсатара да напружання U роўная суме плошчаў усіх аналагічных слупкоў, г. зн. плошчы фігуры пад графікам залежнасці $U(q)$. У дадзеным выпадку гэта плошча трохвугольніка, роўная палове здабытку яго асновы на вышыню:



Рыс. 119

$$A = \frac{qU}{2}.$$

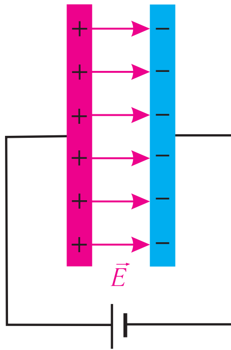
Прырашчэнне энергіі электрастатычнага поля зараджанага кандэнсатара роўнае рабоце, выкананай знешняй сілай пры яго зарадцы:

$$\Delta W = W - 0 = A = \frac{qU}{2}.$$

Улічыўшы, што $q = CU$, формулу для вызначэння энергіі электрастатычнага поля зараджанага кандэнсатара можна запісаць у выглядзе

$$\boldsymbol{W = \frac{CU^2}{2}} \quad \text{або} \quad \boldsymbol{W = \frac{q^2}{2C}}.$$

Энергію электрастатычнага поля зараджанага кандэнсатара можна выразіць праз напружанасць $\vec{E}$ поля, засяроджанага паміж яго абкладкамі (рыс. 120).



Рыс. 120

Электраёмістасць плоскага кандэнсатара $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$, напружанне паміж абкладкамі $U = Ed$. Значыць,

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V,$$

дзе $V = Sd$ — аб'ём прасторы паміж абкладкамі кандэнсатара.

Прымяненне кандэнсатараў. Кандэнсатары знаходзяць шырокае прымяненне ў электратэхніцы, радыётэхнічнай і тэлевізійнай апаратуры, радыёлакацыйнай тэхніцы, тэлефаніі, тэхніцы лічыльна-рашальных прылад, лазернай тэхніцы, электраэнергетыцы (напрыклад, для павышэння каэфіцыента магутнасці прамысловых установак, рэгулявання напружання ў размеркавальных сетках, у прыладах асвятлення люмінесцэнтнымі лямпамі), металапрамысловасці (напрыклад, для плаўкі і тэрмічнай апрацоўкі металаў), здабывальнай прамысловасці (напрыклад, у электравыбуховых прыладах), медыцынскай тэхніцы (напрыклад, у рэнтгенаўскай апаратуры, прыборах электратэрапіі), фотатэхніцы (для атрымання ўспышкі святла пры фатаграфаванні).

У сувязі з гэтым разам з мініяцюрнымі кандэнсатарамі, якія маюць масу менш за грам і памеры каля некалькіх міліметраў, існуюць кандэнсатары з масай у некалькі тон (рыс. 121).

Рыс. 121

Энергію электрастатычнага поля любога кандэнсатара можна вызначыць па формулах: $W = \frac{qU}{2}$, $W = \frac{CU^2}{2}$, $W = \frac{q^2}{2C}$.

1. Якія факты дазваляюць зрабіць вывад, што электрастатычнае поле валодае энергіяй?

2. Растлумачце, як, выкарыстоўваючы графік залежнасці напружання паміж абкладкамі кандэнсатара ад модуля зараду на іх, можна вылічыць работу пры зарадцы кандэнсатара.

3. Па якой формуле можна разлічыць энергію электрастатычнага поля зараджанага кандэнсатара?

4. Як змяніцца энергія электрастатычнага поля зараджанага кандэнсатара пры павелічэнні адлегласці паміж яго абкладкамі, калі: а) кандэнсатар адключаны ад крыніцы току; б) кандэнсатар падключаны да крыніцы току?

Прыклад рашэння задачы

Плоскі паветраны кандэнсатар, які складаецца з дзвюх абкладак плошчай $S = 100\ \text{см}^2$ кожная, змясцілі ў газу, дыэлектрычная пранікальнасць якой $\varepsilon = 2{,}0$, і падключылі да крыніцы току, напружанне на полюсах якой $U = 120$ В. Вызначце работу, якую неабходна выканаць, каб пасля адключэння кандэнсатара ад крыніцы току павялічыць адлегласць паміж яго абкладкамі ад $d_1 = 1{,}0$ см да $d_2 = 2{,}0$ см.

Дадзена:
$S = 100\ \text{см}^2 = 1{,}00 \cdot 10^{-2}\ \text{м}^2$
$\varepsilon = 2{,}0$
$U = 120$ В
$d_1 = 1{,}0\ \text{см} = 1{,}0 \cdot 10^{-2}$ м
$d_2 = 2{,}0\ \text{см} = 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ м

A — ?

Рашэнне. Модуль зараду кожнай з абкладак кандэнсатара $q = C_1 U = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U}{d_1}$. Энергія электрастатычнага поля кандэнсатара да змены адлегласці паміж яго абкладкамі $W_1 = \frac{qU}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d_1}$. Пасля адключэння кандэнсатара ад крыніцы току зарады на яго абкладках не змяняюцца.

Энергію электрастатычнага поля кандэнсатара пасля павелічэння адлегласці паміж яго пласцінамі вызначым наступным чынам:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{(\varepsilon_0 \varepsilon S U)^2 d_2}{2d_1^2 \varepsilon_0 \varepsilon S} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2 d_2}{2d_1^2}.$$

Работа, якую неабходна выканаць, каб павялічыць адлегласць паміж абкладкамі кандэнсатара, роўная прырашчэнню энергіі электрастатычнага поля кандэнсатара: $A = W_2 - W_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2 d_2}{2d_1^2} - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d_1} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d_1}\left(\frac{d_2}{d_1} - 1\right)$.

$$A = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 2{,}0 \cdot 1{,}00 \cdot 10^{-2}\ \text{м}^2 \cdot 120^2\ \text{В}^2}{2 \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м}} \left(\frac{2{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м}}{1{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м}} - 1 \right) =$$

$$= 1{,}3 \cdot 10^{-7}\ \text{Дж} = 0{,}13\ \text{мкДж}.$$

Адказ: $A = 0{,}13$ мкДж.

Практыкаванне 17

1. Вызначце энергію электрастатычнага поля кандэнсатара электраёмістасцю $C = 0{,}20$ мкФ, калі напружанне на ім $U = 200$ В.

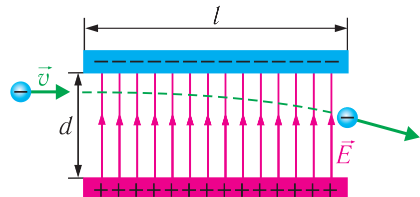
2. Модуль напружанасці аднароднага электрастатычнага поля паміж абкладкамі плоскага паветранага кандэнсатара $E = 200\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Вызначце адлегласць паміж абкладкамі, калі плошча кожнай з іх $S = 100\ \text{см}^2$, а энергія электрастатычнага поля кандэнсатара $W = 35{,}4$ мкДж.

3. Энергія электрастатычнага поля зараджанага плоскага кандэнсатара $W_1 = 5$ мкДж, калі паміж яго абкладкамі знаходзіцца газа, дыэлектрычная пранікальнасць якой $\varepsilon_1 = 2$. Вызначце энергію поля гэтага кандэнсатара, калі прастора паміж яго абкладкамі будзе запоўнена маслам, дыэлектрычная пранікальнасць якога $\varepsilon_2 = 2{,}5$.

4. Плоскі кандэнсатар, плошча кожнай абкладкі якога $S = 40\ \text{см}^2$, а адлегласць паміж імі $d = 8{,}0$ мм, запоўнены трансфарматарным маслам, дыэлектрычная пранікальнасць якога $\varepsilon = 2{,}5$. Вызначце энергію і модуль напружанасці электрастатычнага поля кандэнсатара, калі напружанне на ім $U = 200$ В.

5. Плоскі кандэнсатар падключылі да крыніцы току і зарадзілі да напружання $U_1 = 220$ В. Адключыўшы кандэнсатар ад крыніцы току, павялічылі адлегласць паміж яго абкладкамі ад $d_1 = 1{,}0$ см да $d_2 = 3{,}0$ см. Вызначце модуль напружанасці электрастатычнага поля і напружанне паміж абкладкамі кандэнсатара пасля іх рассоўвання.

6*. Электрон улятае ў плоскі паветраны кандэнсатар паралельна канту яго абкладкі (рыс. 122) са скорасцю, модуль якой $v = 6{,}5 \cdot 10^6\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Адлегласць паміж абкладкамі $d = 5{,}0$ мм, даўжыня кожнай з іх $l = 50$ мм. Вызначце напружанне на кандэнсатары, калі падчас руху ў яго электрастатычным полі электрон адхіліўся ад першапачатковага напрамку на адлегласць $h = 2{,}0$ мм. Дзеянне сілы цяжару не прымайце пад увагу.



Рыс. 122

Глава 4

ПАСТАЯННЫ ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК

Пры вывучэнні фізікі ў 8 класе вы даведаліся, што:

– электрычным токам называюць накіраваны (упарадкаваны) рух зараджаных часціц — носьбітаў зараду;

– за напрамак току ў праваднiках прыняты напрамак упарадкаванага перамяшчэння дадатных носьбітаў зараду;

– за сілу току прымаюць фізічную скалярную велічыню, роўную адносіне зараду, які прайшоў праз папярочнае сячэнне праваднiка, да прамежку часу: $I = \frac{q}{t}$.

Тэрмін «электрычны ток» і вызначэнне напрамку току ўведзены Амперам у 1820 г. Пастаянны ток — мадэль электрычнага току, у якой сіла току не залежыць ад часу і размеркаванне зараду ў праваднiку застаецца нязменным.

Вы навучыліся збіраць электрычныя ланцугі і ведаеце, што абавязковымі іх звёнамі з'яўляюцца крыніца току і спажывец. Крыніца току забяспечвае неабходнае напружанне на спажыўцы — устройстве, у якім трэба стварыць электрычны ток і выкарыстаць штосьці з яго дзеянняў: цеплавога, хімічнага, магнітнага, светлавога. У дадзенай главе мы разгледзім умовы існавання току і працэсы, якія адбываюцца ў электрычным ланцугу, увядзём характарыстыкі крыніцы току. Гэта стала магчымым пасля вывучэння вамі характарыстык і ўласцівасцей электрастатычнага поля, асабліва яго патэнцыяльнасці.

§ 22. Умовы існавання пастаяннага электрычнага току. Пабочныя сілы. ЭРС крыніцы току

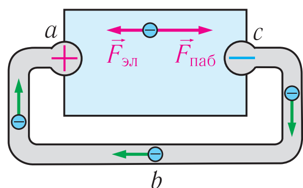
Як вы ўжо ведаеце, для ўзнікнення электрычнага току неабходна наяўнасць свабодных зараджаных часціц, здольных перамяшчацца па

праваднікy пад дзеяннем сіл электрычнага поля. Такі электрычны ток называюць токам праводнасці. Што забяспечвае існаванне электрычнага току ў праваднікy на працягу доўгага часу?

Пры вывучэнні § 18 «Праваднікі ў электрастатычным полі» вы даведаліся, што рух свабодных зараджаных часціц у праваднікy пад дзеяннем сіл электрычнага поля прыводзіць да з'яўлення індуцыраваных зарадаў. Гэтыя зарады ствараюць электрычнае поле, якое цалкам кампенсуе знешняе электрычнае поле, таму рух свабодных зараджаных часціц у праваднікy хутка спыняецца.

Для падтрымання ў праваднікy пастаяннага электрычнага току неабходна, каб праваднік з'яўляўся часткай замкнутага ланцуга, які змяшчае крыніцу току, дзе ажыццяўляецца работа па перамяшчэнні зарадаў супраць сіл электрычнага поля.

Разгледзім замкнуты электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току (участак *ac*) і металічнага правадніка (участак *abc*) (рыс. 124).



Рыс. 124

У праваднікy *abc* свабодныя электроны пад уздзеяннем сіл электрычнага поля перамяшчаюцца ад пункта *c* да пункта *a*. Каб рух носьбітаў зарадаў у ланцугу быў працяглым, электроны ад пункта *a* павінны перамяшчацца да пункта *c*. Самаадвольна такое перамяшчэнне зарадаў адбывацца не можа, паколькі на іх у супрацьлеглым напрамку (ад пункта *c* да пункта *a*) дзейнічаюць сілы электрычнага поля. Рух электронаў супраць сіл электрычнага поля магчымы толькі пад уздзеяннем сіл неэлектрастатычнай прыроды, якія атрымалі назву *пабочных сіл*. Пабочныя сілы дзейнічаюць на зараджаныя часціцы толькі ўнутры крыніцы току.

Узнікненне пабочных сіл у крыніцах электрычнага току абумоўлена хімічнымі рэакцыямі, механічнымі, цеплавымі і іншымі працэсамі, якія ў іх адбываюцца.

У любой крыніцы току пабочныя сілы выконваюць работу па падзеле дадатных і адмоўных зарадаў, у выніку чаго адзін полюс крыніцы зараджаны дадатна, а другі — адмоўна. Напрыклад, у хімічных крыніцах току (гальванічных элементах, акумулятарах) падзел зарадаў адбываецца пры хімічных рэакцыях, у электрамеханічных індукцыйных генератарах — пры выкананні механічнай работы, у сонечных батарэях — пад уздзеяннем энергіі сонечнага выпраменьвання і г. д.

Участак ланцуга, на якім зарады рухаюцца пад дзеяннем толькі электрычных сіл, называюць *знешнім* (розныя спажыўцы электрычнага току, злучальныя правады, вымяральныя прыборы). Участак ланцуга, на якім зарады рухаюцца пад дзеяннем пабочных і электрычных сіл, называюць *унутраным* (крыніца току).

Асноўнай характарыстыкай крыніцы току з'яўляецца *электрарухаючая сіла* (ЭРС). Абазначаюць яе $\mathscr{E}$.

Тэрмін «электрарухаючая сіла» не зусім удалы, паколькі ў дадзеным выпадку гаворка не ідзе ні пра якую сілу, вымераную ў ньютанах. Таму ў далейшым мы будзем выкарыстоўваць толькі скарочаную назву ЭРС.

ЭРС $\mathscr{E}$ называюць фізічную скалярную велічыню, роўную адносіне работы $A_{паб}$ пабочных сіл па перамяшчэнні дадатнага электрычнага зараду ўнутры крыніцы току ад яго адмоўнага полюса да дадатнага да значэння гэтага зараду q:

$$\mathscr{E} = \frac{A_{паб}}{q}.$$

Такім чынам, ЭРС лікава роўная рабоце пабочных сіл па перамяшчэнні адзінкавага зараду ўнутры крыніцы току паміж яго полюсамі (дадатнага зараду ад адмоўнага полюса да дадатнага, адмоўнага зараду, наадварот, ад дадатнага полюса да адмоўнага).

У СІ ЭРС, як і напружанне, вымяраюць у вольтах (В).

ЭРС з'яўляецца энергетычнай характарыстыкай крыніцы току. Энергія электрычнага зараду, які перамяшчаецца ўнутры крыніцы, павялічваецца за кошт работы пабочных сіл. Пры падключэнні праваднiка да полюсаў крыніцы гэта энергія расходуецца на перамяшчэнне зараду па ўсім электрычным ланцугу.

Калі электрычны ланцуг замкнуты, то можна гаварыць, што ЭРС лікава роўная рабоце пабочных сіл па перамяшчэнні адзінкавага дадатнага зараду па ўсім замкнутым ланцугу, паколькі работа электрычных сіл у замкнутым ланцугу роўная нулю.

1. Для існавання пастаяннага электрычнага току ў праваднiку неабходна, каб праваднiк з'яўляўся часткай замкнутага ланцуга, што змяшчае крыніцу току, якая стварае і падтрымлівае ў праваднiку электрычнае поле на працягу доўгага прамежку часу.

2. Унутры крыніцы току перанос носьбітаў зараду супраць сіл электрычнага поля ажыццяўляюць сілы неэлектрастатычнай прыроды, якія называюць пабочнымі сіламі.

3. Участак ланцуга, на якім носьбіты зараду рухаюцца пад уздзеяннем толькі электрычных сіл, называюць знешнім. Участак ланцуга, на якім носьбіты зараду рухаюцца пад уздзеяннем пабочных і электрычных сіл, называюць унутраным.

4. ЭРС называюць фізічную скалярную велічыню, роўную адносіне работы пабочных сіл па перамяшчэнні дадатнага электрычнага зараду ўнутры крыніцы току ад яго адмоўнага полюса да дадатнага да значэння гэтага зараду:

$$\mathscr{E} = \frac{A_{\text{паб}}}{q}.$$

?

1. Якія ўмовы існавання электрычнага току?

2. Якія сілы называюць пабочнымі?

3. Якая роля крыніцы току ў электрычным ланцугу?

4. Што называюць знешнім участкам электрычнага ланцуга? унутраным?

5. Якія напрамкі руху свабодных электронаў на знешнім і ўнутраным участках ланцуга?

6. Што называюць ЭРС крыніцы току?

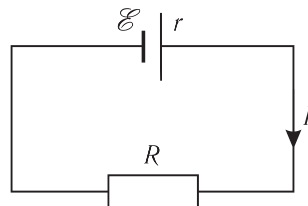
7*. Ці існуе электрычнае поле паміж полюсамі крыніцы току ў незамкнутым ланцугу? Адлюструйце схематычна электрычнае поле крыніцы току ў замкнутым і незамкнутым ланцугу.

§ 23. Закон Ома для поўнага электрычнага ланцуга. ККД крыніцы току

Нямецкі фізік Георг Сімон Ом эксперыментальна даказаў, што сіла электрычнага току I у аднародным металічным правадніку залежыць ад напружання U паміж яго канцамі. На падставе гэтага быў сфармуляваны закон, названы законам Ома для ўчастка электрычнага ланцуга: $I = \frac{U}{R}$, дзе R — супраціўленне ўчастка ланцуга. Высветлім, ад чаго і як залежыць сіла току ў замкнутым ланцугу, які змяшчае крыніцу току, г. зн. у поўным электрычным ланцугу.

Закон Ома для поўнага электрычнага ланцуга. Разгледзім электрычны ланцуг, што складаецца з крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E}$ і супраціўленнем r, якое называюць унутраным, і рэзістара супраціўленнем R (супраціўленне злучальных правадоў не прымаем пад увагу) (рыс. 125). Няхай сіла току ў ланцугу I, а напружанне на знешнім участку ланцуга U.

Закон Ома для поўнага ланцуга звязвае сілу току I у ланцугу, ЭРС $\mathscr{E}$ крыніцы току і поўнае супраціўленне ланцуга $R + r$, якое складаецца з супраціўлення знешняга (рэзістар) і ўнутранага (крыніца току) участкаў ланцуга. Гэтую сувязь можна ўстанавіць тэарэтычна на падставе закона захавання энергіі.



Рыс. 125

Калі праз папярочнае сячэнне праваднікa за прамежак часу t праходзіць зарад q, то работу пабочных сіл па перамяшчэнні электрычнага зараду можна вызначыць па формуле

$$A_{\text{паб}} = \mathscr{E}q.$$

З улікам азначэння сілы току $I = \dfrac{q}{t}$:

$$A_{\text{паб}} = \mathscr{E}It. \qquad (23.1)$$

У нерухомых праваднiках нязменнага хімічнага саставу ў выніку работы пабочных сіл адбываецца павелічэнне толькі ўнутранай энергіі знешняга і ўнутранага участкаў ланцуга. Такім чынам, пры праходжанні электрычнага току ў рэзістары і крыніцы току выдзяляецца колькасць цеплаты Q, якую можна вызначыць па законе Джоўля—Ленца:

$$Q = I^2Rt + I^2rt. \qquad (23.2)$$

На падставе закона захавання энергіі

$$A_{\text{паб}} = Q. \qquad (23.3)$$

Падставім формулы (23.1) і (23.2) у формулу (23.3) і ў выніку матэматычных пераўтварэнняў атрымаем

$$\mathscr{E} = IR + Ir. \qquad (23.4)$$

Здабытак сілы току на супраціўленне ўчастка ланцуга часта называюць падзеннем напружання на гэтым участку. Таму $IR = U$ — падзенне напружання (напружанне) на знешнім участку ланцуга, Ir — падзенне напружання на ўнутраным участку ланцуга.

Выразіўшы сілу току з формулы (23.4), атрымаем

$$\boldsymbol{I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}}. \qquad (23.5)$$

Формула (23.5) з’яўляецца матэматычным выразам *закона Ома для поўнага электрычнага ланцуга*, згодна з якім **сіла току I у поўным электрычным ланцугу прама прапарцыяльная ЭРС $\mathscr{E}$ крыніцы току і адваротна прапарцыянальная поўнаму супраціўленню ланцуга $R + r$.**

Пераўтварым формулу (23.4):

$$IR = \mathscr{E} - Ir,$$

паколькі $IR = U$, то

$$U = \mathscr{E} - Ir. \tag{23.6}$$

Выкарыстаўшы формулу (23.6), прааналізуем розныя рэжымы работы электрычнага ланцуга:

1. Ланцуг разамкнуты ($I = 0$): тады $U = \mathscr{E}$.

Такім чынам, у разамкнутым ланцугу ЭРС крыніцы току роўная напружанню паміж яго полюсамі. У гэтым выпадку можна вымераць ЭРС крыніцы току, падключыўшы да яе полюсаў вальтметр з бясконца вялікім уласным супраціўленнем, каб не парушыць рэжым разамкнутага ланцуга.

2. Супраціўленне знешняга ўчастка ланцуга імкнецца да нуля ($R \to 0$): тады сіла току ўзрастае і дасягае максімальнага значэння. Падзенне напружання крыніцы току пры гэтым роўнае ЭРС, а напружанне паміж яе полюсамі — нулю.

Такі рэжым работы крыніцы току называюць кароткім замыканнем, а максімальную для дадзенай крыніцы сілу току называюць сілай току кароткага замыкання:

$$\boldsymbol{I_{\text{к.з}} = \frac{\mathscr{E}}{r}},$$

дзе r — унутранае супраціўленне крыніцы току.

Для крыніц току з нязначным унутраным супраціўленнем (напрыклад, у аўтамабільных акумулятараў $r \approx 0{,}01$ Ом) рэжым кароткага замыкання надзвычай небяспечны, паколькі можа прывесці да пашкоджання крыніцы току і нават быць прычынай пажару.

Каэфіцыент карыснага дзеяння крыніцы току. Пры перамяшчэнні зараду q па знешнім участку ланцуга, напружанне на якім U, за прамежак часу t сілы электрычнага поля выконваюць работу

$$A = Uq.$$

Выкарыстаўшы выраз $I = \frac{q}{t}$, атрымаем формулу для разліку работы электрычнага току, выкананай на знешнім участку ланцуга:

$$A = IUt.$$

У агульным выпадку работа току можа ператварацца ў механічную работу $A_{мех}$ электрарухавікоў, расходавацца на павелічэнне ўнутранай энергіі ўчастка ланцуга (выдзяленне колькасці цеплаты Q), забяспечваць прырашчэнне хімічнай энергіі $\Delta E_{хім}$, а таксама пераўтварацца ў энергію ўзнікшага электрамагнітнага выпраменьвання $E_{выпр}$:

$$IUt = A_{мех} + Q + \Delta E_{хім} + E_{выпр}.$$

! Калі да крыніцы току падключаны толькі электрарухавік, то $IUt = A_{мех} + Q$ і карысная работай будзе $A_{мех}$.

Калі праходжанне току суправаджаецца хімічнымі рэакцыямі (напрыклад, зарадка акумулятара), то $IUt = \Delta E_{хім} + Q$ і карысная работа будзе роўная $\Delta E_{хім}$.

Пры рабоце электраасвятляльнага абсталявання $IUt = E_{выпр} + Q$ і карысная работа роўная $E_{выпр}$.

Пры ўключэнні ў ланцуг толькі электранагравальных прыбораў $IUt = Q$ і карысная работа роўная Q.

Пры вывучэнні фізікі ў 8 класе вы даведаліся, што згодна з эксперыментальна ўстаноўленым законам Джоўля—Ленца колькасць цеплаты, якая выдзяляецца ў правадніку пры праходжанні электрычнага току, вызначаюць па формуле $Q = I^2Rt$.

Значыць, работа току на адвольным участку ланцуга ў агульным выпадку не роўная колькасці цеплаты, што выдзяляецца на гэтым участку пры праходжанні току, г. зн. $IUt \neq I^2Rt$.

Роўнасць $IUt = I^2Rt$ выконваецца толькі ў тым выпадку, калі на ўчастку ланцуга мае месца пераўтварэнне энергіі электрычнага поля, якое падтрымліваецца крыніцай току, ва ўнутраную энергію гэтага ўчастка.

Такім чынам, калі знешнім участкам ланцуга з'яўляецца награвальны элемент (або рэзістар), то формула для разліку карыснай работы электрычнага току на знешнім участку ланцуга

$$A_{карысн} = I^2Rt.$$

Улічваючы, што магутнасць $P = \frac{A}{t}$, атрымаем выраз для вызначэння карыснай магутнасці току на знешнім участку ланцуга:

$$P_{карысн} = I^2R = IU.$$

Паколькі работа пабочных сіл крыніцы току

$$A_{паб} = A_{поўн} = I\mathscr{E}t,$$

то магутнасць, якая развіваецца пабочнымі сіламі крыніцы току пры наяўнасці ў ланцугу толькі награвальнага элемента:

$$P_{\text{паб}} = P_{\text{поўн}} = I\mathscr{E} = IU + I^2 r.$$

Такім чынам, $P_{\text{поўн}} = P_{\text{карысн}} + I^2 r.$

Адносіну карыснай магутнасці $P_{\text{карысн}}$ току на знешнім участку ланцуга да поўнай магутнасці $P_{\text{поўн}}$, якая развіваецца пабочнымі сіламі крыніцы току, называюць каэфіцыентам карыснага дзеяння (ККД) крыніцы току ў дадзеным ланцугу:

$$\eta = \frac{P_{\text{карысн}}}{P_{\text{поўн}}} \cdot 100\ \% = \frac{A_{\text{карысн}}}{A_{\text{поўн}}} \cdot 100\ \%.$$

Напрыклад, пры зарадцы акумулятара ад крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E}$ пры сіле зараднага току I ККД гэтай крыніцы вызначаюць па формуле $\eta = \frac{\Delta E_{\text{хім}}}{I\mathscr{E}t} \cdot 100\,\%$.

Калі знешні ўчастак ланцуга — награвальны элемент, то

$$P_{\text{карысн}} = I^2 R, \quad P_{\text{поўн}} = I^2 (R + r).$$

Тады ККД крыніцы току

$$\eta = \frac{R}{R + r} \cdot 100\ \%.$$

1. Сіла току ў поўным ланцугу прама прапарцыянальная ЭРС крыніцы току і адваротна прапарцыянальная поўнаму супраціўленню ланцуга (закон Ома для поўнага электрычнага ланцуга):

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}.$$

2. У разамкнутым электрычным ланцугу ЭРС крыніцы току роўная напружанню паміж яго полюсамі.

3. Кароткае замыканне — рэжым работы крыніцы току, пры якім супраціўленне знешняга ўчастка ланцуга імкнецца да нуля, а сіла току дасягае максімальнага для дадзенай крыніцы току значэння.

4. Адносіну карыснай магутнасці току на знешнім участку ланцуга да поўнай магутнасці, якая развіваецца пабочнымі сіламі крыніцы току, называюць каэфіцыентам карыснага дзеяння крыніцы току ў дадзеным ланцугу:

$$\eta = \frac{P_{\text{карысн}}}{P_{\text{поўн}}} \cdot 100\,\%.$$

?

1. Сфармулюйце закон Ома для поўнага ланцуга.
2. Як можна вымераць ЭРС крыніцы току?
3. Які рэжым работы электрычнага ланцуга адпавядае кароткаму замыканню?
4. Што разумеюць пад сілай току кароткага замыкання?
5. Што разумеюць пад карыснай работай электрычнага току? поўнай работай крыніцы току?
6. Як вызначыць карысную магутнасць электрычнага току? поўную магутнасць крыніцы току?
7. Што называюць каэфіцыентам карыснага дзеяння (ККД) крыніцы току?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Рэзістар супраціўленнем $R = 3{,}0$ Ом падключаны да крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E} = 8{,}0$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 1{,}0$ Ом. Вызначце карысную магутнасць току і ККД крыніцы току ў дадзеным ланцугу.

Дадзена:
$R = 3{,}0$ Ом
$\mathscr{E} = 8{,}0$ В
$r = 1{,}0$ Ом

$P_{карысн}$ — ?
η — ?

Рашэнне. Карыснай з'яўляецца магутнасць току на знешнім участку ланцуга, г. зн. на рэзістары $P_{карысн} = I^2R$. З улікам закона Ома для поўнага ланцуга $I = \dfrac{\mathscr{E}}{R+r}$ атрымаем $P_{карысн} = \dfrac{\mathscr{E}^2 R}{(R+r)^2}$.

$$P_{карысн} = \frac{64\ \text{В}^2 \cdot 3{,}0\ \text{Ом}}{(3{,}0\ \text{Ом} + 1{,}0\ \text{Ом})^2} = 12\ \text{Вт}.$$

ККД крыніцы току ў дадзеным ланцугу вызначым па формуле $\eta = \dfrac{R}{R+r} \cdot 100\ \%$.

$$\eta = \frac{3{,}0\ \text{Ом}}{3{,}0\ \text{Ом} + 1{,}0\ \text{Ом}} \cdot 100\ \% = 75\ \%.$$

Адказ:: $P_{карысн} = 12$ Вт, $\eta = 75$ %.

Прыклад 2. Электрарухавік, падключаны да крыніцы пастаяннага току з напружаннем $U = 120$ В, спажывае ток сілай $I = 6{,}0$ А. Знайдзіце супраціўленне яго абмоткі, калі ККД электрарухавіка $\eta = 80$ %.

Дадзена:
$U = 120$ В
$I = 6{,}0$ А
$\eta = 0{,}80$

R — ?

Рашэнне. Магутнасць, якую спажывае электрарухавік, вызначым па формуле $P_{поўн} = IU$ (1).

Частка гэтай магутнасці затрачваецца на награванне абмоткі: $P = I^2R$, а частка — ператвараецца ў карысную механічную магутнасць $P_{карысн}$ электрарухавіка. Згодна з законам захавання энергіі $P_{поўн} = I^2R + P_{карысн}$ (2).

Выкарыстаўшы формулы (1) і (2), запішам выраз для знаходжання карыснай магутнасці электрарухавіка:

$$P_{\text{карысн}} = P_{\text{поўн}} - I^2R = IU - I^2R \quad (3).$$

ККД электрарухавіка вызначым па формуле $\eta = \frac{P_{\text{карысн}}}{P_{\text{поўн}}} \cdot 100\,\%$.

З улікам формул (1) і (3) атрымаем $\eta = \frac{IU - I^2R}{IU} = 1 - \frac{IR}{U}$ (4).

Супраціўленне абмоткі электрарухавіка выразім з формулы (4):

$$R = \frac{U(1-\eta)}{I}.$$

$$R = \frac{120\ \text{В} \cdot (1-0{,}80)}{6{,}0\ \text{А}} = 4{,}0\ \text{Ом}.$$

Адказ: $R = 4{,}0$ Ом.

Практыкаванне 18

1. Сіла току ў ланцугу $I = 1{,}5$ А. Вызначце работу пабочных сіл за прамежак часу $t = 1{,}0$ мін, калі ЭРС крыніцы току $\mathscr{E} = 6{,}0$ В.

2. Рэзістар супраціўленнем $R = 2$ Ом падключаны да крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E} = 5$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 0{,}5$ Ом. Вызначце сілу току ў ланцугу і падзенне напружання на знешнім і ўнутраным участках электрычнага ланцуга.

3. Рэастат падключаны да крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E} = 4$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 1$ Ом. Пабудуйце графік залежнасці сілы току ад супраціўлення часткі рэастата, па якой праходзіць ток, $I = I(R)$.

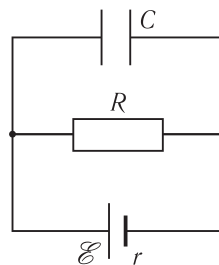
4. Пры падключэнні да крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E} = 2{,}2$ В рэзістара супраціўленнем $R = 4{,}0$ Ом сіла току ў ланцугу $I = 0{,}50$ А. Вызначце сілу току пры кароткім замыканні крыніцы току.

5. Вызначце поўную магутнасць, якая развіваецца крыніцай току з унутраным супраціўленнем $r = 0{,}50$ Ом пры падключэнні да яе рэзістара супраціўленнем $R = 2{,}0$ Ом, калі напружанне на рэзістары $U = 4{,}0$ В.

6. Спіраль награвальнага элемента супраціўленнем $R = 38$ Ом падключана да крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E} = 12$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 2{,}0$ Ом. Вызначце колькасць цеплаты, якая выдзеліцца ў спіралі за прамежак часу $t = 10$ мін.

7. Два паралельна злучаныя рэзістары супраціўленнямі $R_1 = 4{,}0$ Ом і $R_2 = 6{,}0$ Ом падключылі да крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E} = 12$ В і ўнутраным супра-

ціўленнем $r = 0,60$ Ом. Вызначце напружанне на рэзістарах і сілу току ў кожным з іх.



Рыс. 126

8. Модуль напружанасці электрастытычнага поля плоскага кандэнсатара, падключанага да крыніцы пастаяннага току (рыс. 126), $E = 3,0\ \frac{кВ}{м}$. Вызначце адлегласць паміж абкладкамі кандэнсатара, калі ЭРС крыніцы току $\mathscr{E} = 0,16$ кВ, яе ўнутранае супраціўленне $r = 5,0$ Ом, а супраціўленне рэзістара $R = 15$ Ом.

9. Электрарухавік, падключаны да крыніцы пастаяннага току з напружаннем $U = 220$ В, спажывае ток сілай $I = 12$ А. Вызначце механічную магутнасць і ККД электрарухавіка, калі супраціўленне яго абмоткі $R = 5,0$ Ом.

10*. У электрычны чайнік налілі ваду аб'ёмам $V = 1,0$ л і падключылі да крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E} = 140$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 4,0$ Ом. Вальтметр, падключаны да полюсаў крыніцы току, паказвае напружанне $U = 120$ В. Вызначце, на колькі павялічыцца тэмпература вады за прамежак часу $t = 2,0$ мін, калі ККД чайніка $\eta = 70\%$. Шчыльнасць вады $\rho = 1,0 \cdot 10^3\ \frac{кг}{м^3}$, удзельная цеплаёмістасць вады $c = 4,2 \cdot 10^3\ \frac{Дж}{кг \cdot К}$.

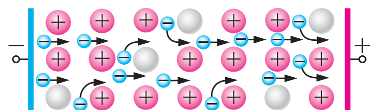
Глава 5

ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК У РОЗНЫХ АСЯРОДДЗЯХ

Пры вывучэнні электрычных з'яў неабходна ведаць, ці магчыма існаванне электрычнага току ў разглядаемым рэчыве, паколькі ўсе рэчывы дзеляць на групы па іх электрычных уласцівасцях: праваднікі, паўправаднікі, дыэлектрыкі. Чым гэтыя групы рэчываў адрозніваюцца адна ад адной? Як яны праводзяць электрычны ток?

Праваднікамі электрычнага току могуць быць рэчывы і ў цвёрдым, і ў вадкім, і ў газападобным станах. Вывучаючы дадзеную тэму, мы адкажам на наступныя пытанні: якія часціцы з'яўляюцца носьбітамі электрычнага зараду ў дадзеным асяроддзі? Як залежыць сіла току ад напружання? Як залежыць электрычная праводнасць асяроддзя ад тэмпературы, выпраменьвання і іншых уздзеянняў? Якое тэхнічнае прымяненне электрычнага току ў розных асяроддзях?

§ 24. Электрычны ток у металах. Залежнасць супраціўлення металаў ад тэмпературы. Звышправоднасць

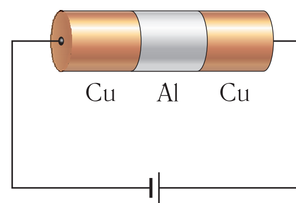


Рыс. 127

Тыповымі прадстаўнікамі класа праваднікоў з'яўляюцца металы. У металічных правадніках носьбіты электрычнага зараду — свабодныя электроны. Пад дзеяннем знешняга электрычнага поля свабодныя электроны ўпарадкавана рухаюцца, ствараючы электрычны ток (рыс. 127).

Прырода электрычнага току ў металах. Электронная праводнасць металаў была ўпершыню эксперыментальна пацверджана нямецкім фізікам К. Рыке

ў 1901 г. Сутнасць доследу заключалася ў наступным: праз праваднік, які складаўся з трох адпаліраваных і шчыльна прыціснутых адзін ад аднаго цыліндраў — двух медных і аднаго алюмініевага (рыс. 128), на працягу года праходзіў ток аднаго і таго ж напрамку. За гэты час праз праваднік прайшоў зарад больш за 3,5 МКл. Пасля завяршэння доследу ўзважванне паказала, што масы цыліндраў засталіся нязменнымі. Гэта з'явілася эксперыментальным доказам таго, што перанос зараду пры праходжанні току ў металах не суправаджаецца хімічнымі працэсамі і пераносам рэчывы, а ажыццяўляецца часціцамі, якія з'яўляюцца агульнымі для ўсіх металаў, г. зн. электронамі.

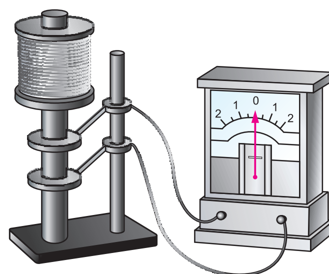


Рыс. 128

Пераканаўчы доказ электроннай прыроды току ў металах быў атрыманы ў доследах з праяўленнем інерцыі электронаў. Ідэя такіх доследаў і першыя вынікі (1913 г.) належаць рускім фізікам Л. І. Мандэльштаму і М. Д. Папалексі.

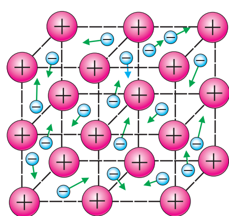
У 1916 г. амерыканскі фізік Р. Толмен і шатландскі фізік Т. Сцюарт удасканалілі методыку гэтых доследаў і выканалі колькасныя вымярэнні, якія неабвержна даказалі, што ток у металічных правадніках абумоўлены рухам свабодных электронаў.

У гэтых доследах шпулю з вялікай колькасцю віткоў тонкага дроту падключалі да гальванометра і прыводзілі ў хуткае вярчэнне вакол сваёй восі (рыс. 129). Пры рэзкім тармажэнні шпулі ў ланцугу ўзнікаў кароткачасовы ток, абумоўлены інерцыяй носьбітаў зараду. Па напрамку адхілення стрэлкі гальванометра было ўстаноўлена, што электрычны ток ствараюць адмоўна зараджаныя часціцы. Пры гэтым эксперыментальна атрыманая адносіна зараду кожнай з гэтых часціц да яе масы $\frac{q_0}{m_0}$ (удзельны зарад) блізкая да ўдзельнага зараду электрона, атрыманаму ў іншых доследах. Так было эксперыментальна даказана, што носьбітамі свабодных зарадаў у металах з'яўляюцца электроны.



Рыс. 129

Рэчывы, якія валодаюць электроннай праводнасцю, называюць *праваднікамі першага роду*.

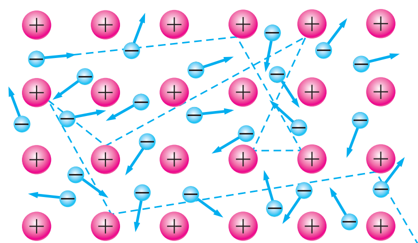


Рыс. 130

У адпаведнасці з класічнай электроннай тэорыяй праводнасці металаў, створанай нямецкім фізікам П. Друдзе і галандскім фізікам Х. Лорэнцам у 1900—1904 гг., металічны праваднік можна разглядаць як фізічную сістэму, якая складаецца са свабодных электронаў і дадатна зараджаных іонаў, што вагаюцца каля становішчаў раўнавагі (рыс. 130).

З'яўленне свабодных электронаў пры ўтварэнні металічнага крышталя з нейтральных атамаў можна спрошчана растлумачыць наступным чынам. Электроны, якія знаходзяцца на знешніх абалонках атамаў, слаба звязаны са сваімі ядрамі. Пры ўтварэнні крышталя атамы збліжаюцца на адлегласць $r \sim 0{,}1$ нм і электроны пачынаюць узаемадзейнічаць не толькі са сваімі ядрамі, але і з ядрамі суседніх атамаў. У выніку гэтага іх узаемадзеянне з уласнымі ядрамі становіцца вельмі слабым, з прычыны чаго яны губляюць з імі сувязь і могуць рухацца па ўсім крышталі ў любым напрамку як свабодныя часціцы. Атамы ператвараюцца пры гэтым у дадатна зараджаныя іоны. У прасторы паміж іонамі хаатычна рухаюцца, падобна часціцам ідэальнага газу, свабодныя электроны. Таму для апісання руху электронаў выкарыстоўваюць мадэль «электронны газ» — сукупнасць свабодных электронаў у крышталічнай рашотцы металу. На рысунку 131 пункцірнай лініяй паказана траекторыя руху аднаго з электронаў.

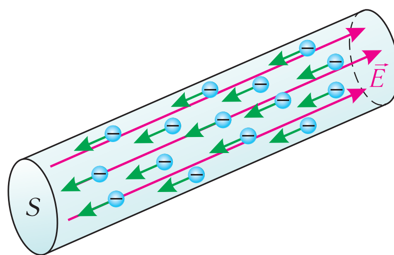
У гэтай мадэлі электроны, упарадкаваны рух якіх з'яўляецца токам праводнасці, разглядаюць як матэрыяльныя пункты, модуль патэнцыяльнай энергіі ўзаемадзеяння якіх надзвычай малы ў параўнанні з іх кінетычнай энергіяй. Лічаць, што рух электронаў пад уздзеяннем электрычнага поля падпарадкоўваецца законам класічнай механікі, а іх сутыкненні з іонамі крышталічнай рашоткі металу з'яўляюцца няпругімі, г. зн. пры сутыкненнях электроны цалкам перадаюць іонам кінетычную энергію свайго ўпарадкаванага руху. У прамежках паміж сутыкненнямі свабодныя электроны выконваюць хаатычны цеплавы рух і ў той жа час рухаюцца ўпарадкавана і роўнапаскорана пад уздзеяннем электрычнага поля.



Рыс. 131

Мадэль электроннага газу дае магчымасць тэарэтычна растлумачыць прыроду супраціўлення і вывесці закон Ома для ўчастка ланцуга, які не змяшчае крыніцы току, на аснове класічнай электроннай тэорыі праводнасці металаў. Прааналізуем упарадкаваны рух электронаў праводнасці.

Няхай электрон рухаецца з паскарэннем $\vec{a}$ у напрамку, супрацьлеглым напрамку напружанасці $\vec{E}$ электрычнага поля (рыс. 132): $\vec{a}=\frac{\vec{F}}{m_0}=-\frac{e\vec{E}}{m_0}$, дзе m_0 — маса электрона, e — элементарны электрычны зарад (модуль зараду электрона). Тады модуль сярэдняй скорасці яго накіраванага руху $\langle v\rangle=\frac{a\langle t^*\rangle}{2}=\frac{eE\langle t^*\rangle}{2m_0}$, дзе $\langle t^*\rangle$ — усярэднены прамежак часу паміж двума паслядоўнымі сутыкненнямі электрона з іонамі крышталічнай рашоткі.



Рыс. 132

Паколькі электрычнае поле ўнутры аднароднага прамалінейнага правадніка з токам аднароднае, то модуль напружанасці гэтага поля $E=\frac{U}{l}$, дзе l — даўжыня праваднікa, U — напружанне паміж яго канцамі. Таму модуль сярэдняй скорасці накіраванага руху электронаў прапарцыянальны напружанню паміж канцамі праваднікa: $\langle v\rangle \sim U$.

Сіла току ў праваднікy прапарцыянальная модулю сярэдняй скорасці накіраванага руху электронаў:

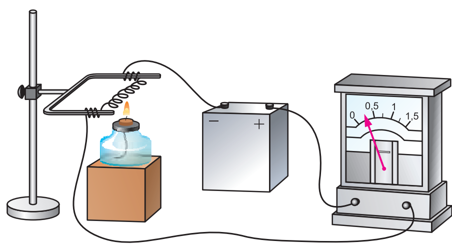
$$I=\frac{q}{t}=\frac{eN}{t}=\frac{eN\langle v\rangle}{l}=\frac{enV\langle v\rangle}{l}=en\langle v\rangle S,$$

дзе q — модуль зараду электронаў праводнасці, $t=\frac{l}{\langle v\rangle}$ — час іх праходжання па праваднікy, N — колькасць электронаў праводнасці ў праваднікy, n — канцэнтрацыя гэтых электронаў, $V=Sl$ — аб'ём праваднікa.

Значыць, сіла току прапарцыянальная напружанню паміж канцамі праваднікa: $I \sim U$.

Залежнасць супраціўлення металаў ад тэмпературы. Пры вывучэнні фізікі ў 8 класе вы даведаліся, што супраціўленне металічных праваднікоў залежыць ад роду рэчывы (удзельнага супраціўлення ρ) і яго геаметрычных памераў (даўжыні l і плошчы папярочнага сячэння S):

$$R=\rho\frac{l}{S}.$$



Рыс. 133

А ці залежыць супраціўленне ад тэмпературы правадніка?

Правядзём дослед. Збяром электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, драцяной спіралі і гальванометра (рыс. 133). Дослед паказвае, што пры награванні спіралі паказанні гальванометра памяншаюцца. Вывад відавочны: пры павелічэнні тэмпературы супраціўленне металаў павялічваецца.

Удзельнае супраціўленне рэчыва металічнага праваднiка залежыць ад канцэнтрацыі свабодных носьбітаў зараду і колькасці іх сутыкненняў з іонамі крышталічнай рашоткі, што ажыццяўляюць вагальныя рухі каля становішчаў устойлівай раўнавагі.

У металічных праваднiках канцэнтрацыя свабодных электронаў практычна пастаянная для дадзенага праваднiка і не залежыць ад тэмпературы. Аднак колькасць сутыкненняў свабодных электронаў з іонамі крышталічнай рашоткі з ростам тэмпературы павялічваецца. Гэта прыводзіць да росту ўдзельнага супраціўлення металічнага праваднiка пры павышэнні тэмпературы.

Пры апісанні тэмпературнай залежнасці ўдзельнага супраціўлення праваднiка ўводзяць *тэмпературны каэфіцыент супраціўлення* α, лікава роўны адноснаму прырашчэнню ўдзельнага супраціўлення рэчыва праваднiка пры прырашчэнні яго тэмпературы на 1К:

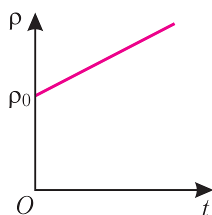
$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 (T - T_0)}, \qquad (24.1)$$

дзе ρ_0 і ρ — удзельныя супраціўленні рэчыва праваднiка адпаведна пры тэмпературы $T_0 = 273$ К (0 °С) і дадзенай тэмпературы T.

З формулы (24.1) вынікае, што

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T),$$

дзе $\Delta T = T - T_0$ — прырашчэнне абсалютнай тэмпературы праваднiка, якое супадае з прырашчэннем тэмпературы па шкале Цэльсія $\Delta T = \Delta t$. Такім чынам, удзельнае супраціўленне рэчыва металічнага праваднiка ўзрастае з павелічэннем тэмпературы.



Рыс. 134

Графік гэтай залежнасці паказаны на рысунку 134.

Паколькі супраціўленне праваднікa $R=\frac{\rho l}{S}$, то, не ўлічваючы нязначную тэмпературную залежнасць адносіны $\frac{l}{S}$, можна запісаць:

$$R = R_0(1+\alpha\Delta T) = R_0(1+\alpha\Delta t), \qquad (24.2)$$

дзе R_0 і R — супраціўленні праваднікa адпаведна пры тэмпературы $T_0 = 273$ К (0 °C) і дадзенай тэмпературы $T\,(t)$.

Для металічных праваднікоў гэтыя формулы можна прымяняць пры тэмпературах $T > 140$ К. Ва ўсіх металаў пры павышэнні тэмпературы супраціўленне ўзрастае, г. зн. тэмпературны каэфіцыент супраціўлення α — велічыня дадатная. Для большасці металаў (але не сплаваў) пры тэмпературах ад 0 да 100 °C сярэдняе значэнне тэмпературнага каэфіцыента супраціўлення $\langle\alpha\rangle \approx \frac{1}{273}$ К$^{-1}$.

Залежнасць супраціўлення металаў ад тэмпературы выкарыстоўваюць у спецыяльных прыборах — тэрмометрах супраціўлення (рыс. 135).

Шырокае распаўсюджанне атрымалі тэрмометры супраціўлення з чыстых металаў, асабліва плаціны і медзі, якія канструктыўна ўяўляюць сабой металічны дрот, наматаны на жорсткі каркас (з кварцу, фарфору, слюды), змешчаны ў ахоўную абалонку (з металу, кварцу, фарфору, шкла) (рыс. 136). Плацінавыя тэрмометры супраціўлення прымяняюць для вымярэння тэмпературы ў межах ад −263 да 1064 °C, медныя — ад −50 да 180 °C.

Рыс. 135

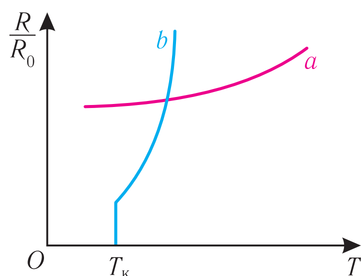
Рыс. 136

Калі пры вырабе электравымяральных прыбораў патрабуюцца праваднікі, супраціўленне якіх павінна як мага менш залежаць ад тэмпературы навакольнага асяроддзя, то выкарыстоўваюць спецыяльныя сплавы — канстантан і манганін. Тэмпературны каэфіцыент супраціўлення ў канстантану ў 820 разоў, а ў манганіну ў 510 разоў меншы, чым у серабра.

Звышправоднасць. Пры вельмі нізкіх тэмпературах супраціўленне некаторых металічных праваднікоў рэзка (скачком) змяншаецца да нуля. Упершыню гэта выявіў у 1911 г. галандскі фізік Г. Камерлінг-Онес (1853—1926). Ён эксперыментальна ўстанавіў, што пры тэмпературы $T \leq 4{,}12$ К (па сучасных

вымярэннях 4,15 К) электрычнае супраціўленне ртуці знікае. Пазней у шматлікіх доследах было выяўлена, што гэта з'ява характэрна для многіх праваднікоў. Тэмпературу, пры якой электрычнае супраціўленне правадніка становіцца роўным нулю, называюць *крытычнай тэмпературай* ($T_к$). Стан правадніка пры гэтым называюць *звышправоднасцю*, а сам праваднік — звышправадніком. Кожны звышправодзячы метал характарызуецца сваёй крытычнай тэмпературай. З'ява звышправоднасці ўласціва не толькі некаторым металам, але і сплавам, паўправаднікам і палімерам.

Залежнасць супраціўлення R звышправадніка ад абсалютнай тэмпературы T пры нізкіх тэмпературах паказана на рысунку 137, графік b; для металу, які не з'яўляецца звышправадніком, — на рысунку 137, графік a.



Рыс. 137

Калі ў звышправадніку стварыць электрычны ток, то ён будзе існаваць у ім неабмежавана доўга. Пры гэтым для падтрымання току няма неабходнасці ў крыніцы току. Гэта ўказвае на перспектыву выкарыстання з'явы звышправоднасці пры перадачы электрычнай энергіі.

Звышправодныя злучэнні знайшлі прымяненне ў якасці матэрыялу абмотак электрамагнітаў для стварэння моцных магнітных палёў ва ўстаноўках кіруемага тэрмаядзернага сінтэзу, а таксама ў магутных электрычных рухавіках і генератарах. Распрацоўваюцца праекты звышправодных электронна-вылічальных машын. Ужо створаны кампактныя інтэгральныя схемы на звышправадніках, якія валодаюць шэрагам пераваг у параўнанні з наяўнымі аналагамі. Магчымасці прымянення з'явы звышправоднасці павялічацца, калі будуць знойдзены матэрыялы, якія валодаюць гэтай уласцівасцю пры не вельмі нізкіх тэмпературах.

1. Электрычны ток у металах уяўляе сабой упарадкаваны рух свабодных электронаў.

2. Металічны праваднік можна разглядаць як фізічную сістэму, якая складаецца са свабодных электронаў і дадатна зараджаных іонаў.

3. Тэмпературны каэфіцыент супраціўлення лікава роўны адноснаму прырашчэнню ўдзельнага супраціўлення правадніка пры прырашчэнні яго тэмпературы на 1 К:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T}.$$

4. Супраціўленне металічнага праваднікa ўзрастае з павелічэннем тэмпературы:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T).$$

5. Стан, пры якім электрычнае супраціўленне праваднікa становіцца роўным нулю, называюць звышправоднасцю, а сам праваднік — звышправаднікoм.

?

1. Якая прырода электрычнага току ў металах?

2. Як было даказана, што носьбітамі электрычнага зараду ў металах з'яўляюцца электроны?

3. Што разумеюць пад электронным газам?

4. Як змяняецца супраціўленне праваднікa пры павышэнні тэмпературы?

5. Што называюць тэмпературным каэфіцыентам супраціўлення?

6. На якой уласцівасці праваднікоў заснавана дзеянне тэрмометра супраціўлення?

7. У чым праяўляецца з'ява звышправоднасці?

Прыклад рашэння задачы

Вызначце супраціўленне алюмініевага праваднікa пры тэмпературы $t_2 = 90$ °C, калі пры тэмпературы $t_1 = 20$ °C яго супраціўленне $R_1 = 4{,}0$ Ом. Тэмпературны каэфіцыент супраціўлення алюмінію $\alpha = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$.

Дадзена:
$t_2 = 90$ °C
$t_1 = 20$ °C
$R_1 = 4{,}0$ Ом
$\alpha = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$

R_2 — ?

Рашэнне. Згодна з формулай (24.2) супраціўленне праваднікa пры тэмпературах t_1 і t_2 адпаведна

$$R_1 = R_0(1 + \alpha \Delta T_1), \; R_2 = R_0(1 + \alpha \Delta T_2).$$

Рашаючы сістэму ўраўненняў, атрымаем

$$R_2 = R_1 \frac{1 + \alpha \Delta T_2}{1 + \alpha \Delta T_1}.$$

Паколькі $\Delta T = \Delta t = t - t_0$, дзе $t_0 = 0{,}0$ °C, то $\Delta T_2 = 90$ К, $\Delta T_1 = 20$ К.

$$R_2 = 4{,}0 \text{ Ом} \cdot \frac{1 + 4{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1} \cdot 90 \text{ К}}{1 + 4{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1} \cdot 20 \text{ К}} = 5{,}1 \text{ Ом}.$$

Адказ: $R_2 = 5{,}1$ Ом.

Практыкаванне 19

1. Вызначце ўдзельнае супраціўленне алюмініевага праваднікa пры тэмпературы $t_0 = 0{,}0$ °C, калі пры тэмпературы $t = 20$ °C яго ўдзельнае супраціўленне $\rho = 2{,}8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Тэмпературны каэфіцыент супраціўлення алюмінію $\alpha = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$.

2. Супраціўленне металічнага праваднікa пры тэмпературы $t_0 = 0{,}0$ °C у $b = 1{,}5$ раза меншае, чым пры тэмпературы $t = 120$ °C. Вызначце тэмпературны каэфіцыент супраціўлення рэчыва праваднікa.

3. Пры тэмпературы $t_0 = 0{,}0$ °C супраціўленне вальфрамавага праваднікa $R_0 = 40$ Ом. Падчас праходжання электрычнага току па праводніках яго супраціўленне павялічылася на $\Delta R = 100$ Ом. Вызначце, на колькі змянілася тэмпература праваднікa. Тэмпературны каэфіцыент супраціўлення вальфраму $\alpha = 5{,}0 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$.

4. Пры тэмпературы $t_1 = 20{,}0$ °C супраціўленне нікелінавага праваднікa $R_1 = 30{,}0$ Ом. Праваднік падключылі да сеткі з напружаннем $U = 120$ В. Вызначце тэмпературу праваднікa, калі па ім праходзіць электрычны ток сілай $I = 800$ мА. Тэмпературны каэфіцыент супраціўлення нікеліну $\alpha = 6{,}50 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$.

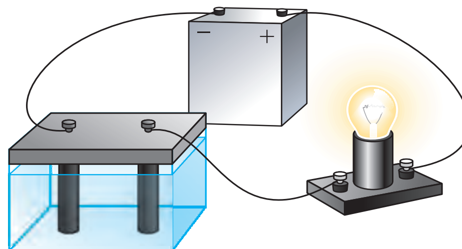
5*. Пры награванні меднага праваднікa, плошча папярочнага сячэння якога $S = 0{,}10$ мм^2, яго супраціўленне павялічылася на $\Delta R = 30$ мОм. Вызначце, на колькі ўзрасла ўнутраная энергія праваднікa. Для медзі тэмпературны каэфіцыент супраціўлення $\alpha = 4{,}3 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$, шчыльнасць $D = 8{,}9 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, удзельная цеплаёмістасць $c = 380\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, удзельнае электрычнае супраціўленне $\rho = 1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

§ 25. Электрычны ток у электралітах. Законы электролізу Фарадэя

Пры вывучэнні папярэдняга параграфа вы даведаліся, што ў металах перанос зараду не суправаджаецца пераносам рэчыва, а носьбітамі свабодных зарадаў з'яўляюцца электроны. Але існуе клас праваднікоў, праходжанне электрычнага току ў якіх заўсёды суправаджаецца хімічнымі зменамі і пераносам рэчыва. Такімі праваднікамі з'яўляюцца растворы многіх солей, кіслот і шчолачаў, а таксама расплавы солей і аксідаў металаў.

Прырода электрычнага току ў электралітах. Рэчывы, растворы або расплавы якіх праводзяць электрычны ток, называюць *электралітамі*.

Збяром электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, лямпы напальвання і ванны з дыстыляванай вадой, у якой знаходзяцца два вугальныя электроды (рыс. 138). Пры замыканні ланцуга лямпа свяціцца не будзе, значыць, дыстыляваная вада не праводзіць электрычны ток. Паўторым дослед, дабавіўшы ў дыстыляваную ваду цукар. Лямпа не свеціцца і ў гэтым выпадку. Раствор цукру ў вадзе таксама не з’яўляецца праваднікам. А цяпер дабавім у дыстыляваную ваду невялікую колькасць солі, напрыклад хларыду медзі(II) $CuCl_2$. У ланцугу праходзіць электрычны ток, пра што наглядна сведчыць свячэнне лямпы. Значыць, раствор солі ў вадзе з’яўляецца праваднікам электрычнага току, г. зн. пры растварэнні хларыду медзі(II) у дыстыляванай вадзе з’явіліся свабодныя носьбіты электрычнага зараду.



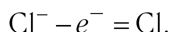
Рыс. 138

Вывучаючы хімію, вы даведаліся, што пры растварэнні солей, кіслот і шчолачаў у вадзе адбываецца электралітычная дысацыяцыя, г. зн. распад малекул электраліту на іоны.

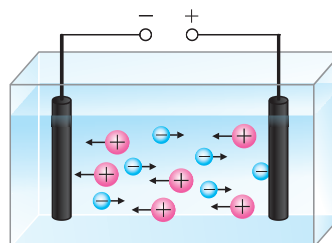
У праведзеным доследзе хларыд медзі(II) $CuCl_2$ у водным растворы дысацыіруе на дадатна зараджаныя іоны медзі Cu^{2+} і адмоўна зараджаныя іоны хлору Cl^-:

$$CuCl_2 \rightarrow Cu^{2+} + 2Cl^-.$$

Іоны Cu^{2+} і Cl^- у растворы пры адсутнасці электрычнага поля рухаюцца хаатычна. Пад дзеяннем знешняга электрычнага поля на хаатычны рух часціц накладваецца накіраваны рух дадатна і адмоўна зараджаных іонаў (рыс. 139). Пры гэтым дадатна зараджаныя іоны Cu^{2+} рухаюцца да электрода, падключанага да адмоўнага полюса крыніцы току (катода), адмоўна зараджаныя іоны Cl^- — да электрода, падключанага да дадатнага полюса крыніцы току (анода). На анодзе будзе адбывацца працэс акіслення іонаў Cl^- да атамаў хлору:

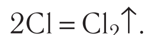


$$Cl^- - e^- = Cl.$$



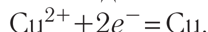
Рыс. 139

Нейтральныя атамы хлору ўтвараюць малекулы хлору, які выдзяляецца на анодзе:



$$2Cl = Cl_2\uparrow.$$

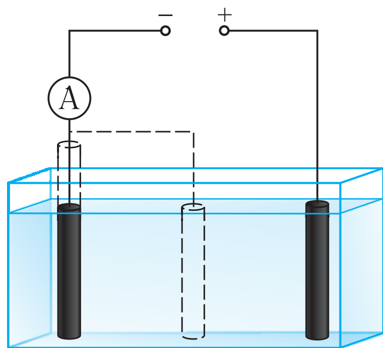
На катодзе будзе адбывацца працэс аднаўлення іонаў Cu^{2+} да нейтральных атамаў і асаджэнне металічнай медзі:



$$Cu^{2+} + 2e^- = Cu.$$

Такім чынам, свабоднымі носьбітамі электрычнага зараду ў электралітах з'яўляюцца дадатна і адмоўна зараджаныя іоны, якія ўтвараюцца ў выніку электралітычнай дысацыяцыі, а праводнасць электралітаў у адрозненне ад праводнасці металаў з'яўляецца іоннай. Электраліты адносяць да *праваднікоў другога роду*.

Супраціўленне электралітаў. Для вывучэння супраціўлення электралітаў збяром электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, электралітычнай ванны і амперметра (рыс. 140).



Рыс. 140

Падтрымліваючы пастаяннае напружанне паміж электродамі, наблізім іх адзін да аднаго. Амперметр пакажа павелічэнне сілы току ў ланцугу. Такім чынам, пры памяншэнні адлегласці паміж электродамі супраціўленне электраліту памяншаецца.

Змесцім адзін з электродаў у электраліт так, каб частка яго выступала над паверхняй раствору. Паказанне ампертметра зменшыцца. Адсюль вынікае, што пры памяншэнні плошчы перакрыцця электродаў у электраліце яго супраціўленне павялічваецца.

Нагрэем электраліт на электрычнай плітцы. Амперметр пакажа павелічэнне сілы току ў ланцугу. Значыць, пры павелічэнні тэмпературы супраціўленне электраліту памяншаецца.

Будзем павялічваць напружанне паміж электродамі ў 2, 3, ..., n разоў. Паказанні амперметра ўзрастаюць, прычым сіла току ў электраліце змяняецца прама прапарцыянальна напружанню, г. зн. для электралітаў выконваецца закон Ома $I = \frac{U}{R_{эл}}$.

Варта адзначыць, што пры праходжанні электрычнага току праз электраліт праяўляецца цеплавое дзеянне току, г. зн. выконваецца закон Джоўля—Ленца $Q = I^2 R_{эл} t$.

Законы электролізу Фарадэя. Пры вывучэнні хіміі вы даведаліся, што працэс выдзялення рэчыва на электродзе, звязаны з акісляльна-аднаўленчымі рэакцыямі, якія адбываюцца пры праходжанні электрычнага току праз растворы (расплавы) электралітаў, называюць *электролізам.*

Першы закон электролізу быў эксперыментальна ўстаноўлены англійскім фізікам Фарадэем у 1833 г.

Маса m рэчыва, якое выдзелілася на электродзе, прама прапарцыянальная электрычнаму зараду q, які прайшоў праз электраліт:

$$m = kq. \tag{25.1}$$

У формуле (25.1) каэфіцыент прапарцыянальнасці называюць *электрахімічным эквівалентам* дадзенага рэчыва. Ён лікава роўны масе рэчыва, якое выдзелілася на адным з электродаў пры праходжанні праз электраліт адзінкавага электрычнага зараду. У СІ электрахімічны эквівалент вымяраюць у кілаграмах на кулон $\left(\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}\right)$. Значэнні электрахімічных эквівалентаў некаторых рэчываў прыведзены ў табліцы 2.

Табліца 2 — Электрахімічны эквівалент рэчыва

Рэчыва	k, 10^{-8} $\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$	Рэчыва	k, 10^{-8} $\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$
Алюміній	9,32	Нікель (двухвалентны)	30,4
Вадарод	1,04	Нікель (трохвалентны)	20,3
Кісларод	8,29	Хлор	36,7
Медзь (аднавалентная)	65,9	Хром	18,0
Медзь (двухвалентная)	32,9	Цынк	33,9

Паколькі $q = It$, дзе I — сіла току, t — прамежак часу праходжання току праз электраліт, то

$$m = kIt.$$

Масу рэчыва, якое выдзелілася на электродзе пры праходжанні праз электраліт электрычнага зараду q, можна вызначыць, ведаючы масу m_0 аднаго іона і колькасць N іонаў, што аселі на гэтым электродзе:

$$m = m_0 N, \quad m_0 = \frac{M}{N_A},$$

дзе M — малярная маса рэчыва, N_A — пастаянная Авагадра.

Тады колькасць іонаў $N = \frac{m}{m_0} = \frac{mN_A}{M}$.

З другога боку, колькасць іонаў, якія нейтралізаваліся на электродзе:

$$N = \frac{q}{q_0},$$

дзе q_0 — зарад аднаго іона. Паколькі зарад іона q_0 кратны элементарнаму зараду e, то $q_0 = en$, дзе n— валентнасць іона.

Значыць, $\frac{mN_A}{M} = \frac{q}{en}$ і

$$m = \frac{M}{enN_A} q. \tag{25.2}$$

Параўнаўшы формулы (25.2) і (25.1), атрымаем

$$k = \frac{M}{enN_A}. \tag{25.3}$$

Паколькі N_A і e — універсальныя пастаянныя, то фізічную велічыню $F = N_A e = 9{,}65 \cdot 10^4 \ \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ у гонар М. Фарадэя назвалі *пастаяннай Фарадэя*.

Такім чынам, формулу (25.3) для вызначэння электрахімічнага эквівалента рэчыва можна запісаць у выглядзе

$$k = \frac{M}{Fn}.$$

Адносіну $\frac{M}{n} = x$ называюць *хімічным эквівалентам* рэчыва. Тады

$$k = \frac{x}{F}.$$

Фарадэй сфармуляваў закон, які называюць *другім законам электролізу*. Гэты закон устанаўлівае сувязь паміж электрахімічным і хімічным эквівален-

тамі рэчыва: **электрахімічныя эквіваленты рэчываў прапарцыянальныя іх хімічным эквівалентам:** $\dfrac{k_1}{k_2} = \dfrac{x_1}{x_2}$.

Паколькі $k = \dfrac{M}{Fn}$, то першы закон электролізу можна запісаць:

$$m = \frac{M}{Fn} It. \tag{25.4}$$

Выраз (25.4) называюць *аб'яднаным законам Фарадэя для электролізу*. Паводле гэтага закона маса рэчыва, якое выдзелілася на кожным з электродаў, прапарцыянальная малярнай масе іонаў гэтага рэчыва, сіле току і часу яго праходжання праз электраліт і адваротна прапарцыянальная валентнасці іонаў рэчыва.

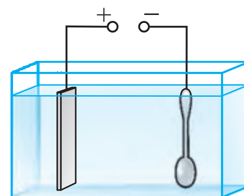
Выкарыстаўшы закон электролізу, можна вызначыць значэнне зараду электрона ў школьнай лабараторыі. Дапусцім, праз электраліт на працягу прамежку часу t праходзіў электрычны ток сілай I (можна вымераць амперметрам). Пры гэтым на электродзе выдзелілася рэчыва масай m (можна вымераць, узважыўшы электрод перад і пасля праходжання току праз электраліт). Тады модуль зараду электрона вызначаюць па формуле

$$e = \frac{M}{N_A mn} It.$$

Тэхнічнае прымяненне электролізу. Электроліз знайшоў розныя прымяненні ў прамысловасці. Разгледзім некаторыя з іх.

1. Нанясенне ахоўных і дэкаратыўных пакрыццяў на металічныя вырабы (гальванастэгія).

Каб засцерагчы металы ад акіслення, а таксама надаць вырабам трываласць і палепшыць знешні выгляд, іх пакрываюць тонкім слоем высакародных металаў (золата, серабра) або малаакісляльнымі металамі (хромам, нікелем). Прадмет, які падлягае гальванічнаму пакрыццю, напрыклад лыжку (рыс. 141), апускаюць у якасці катода ў электралітычную ванну. Электралітам з'яўляецца раствор солі металу, якім ажыццяўляецца пакрыццё. Анодам служыць пласціна з таго ж металу. Прапускаючы праз электралітычную ванну на працягу пэўнага прамежку часу электрычны ток, лыжку пакрываюць слоем металу патрэбнай таўшчыні. Для найбольш раўнамернага пакрыцця лыжкі яе трэба змясціць



Рыс. 141

паміж дзвюма або больш аноднымі пласцінамі. Пасля пакрыцця лыжку вымаюць з ванны, сушаць і паліруюць.

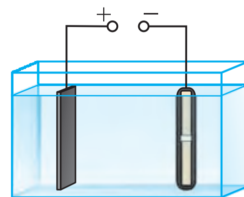
2. Выраб металічных копій з рэльефных мадэлей (гальванапластыка).

Для атрымання копій прадметаў (манет, медалёў, барэльефаў і інш.) робяць злепкі з якога-небудзь пластычнага матэрыялу (напрыклад, воску). Для надання злепку электраправоднасці яго пакрываюць графітавым пылам, апускаюць у ванну ў якасці катода і атрымліваюць на ім слой металу патрэбнай таўшчыні (рыс. 142). Затым шляхам награвання выдаляюць воск.

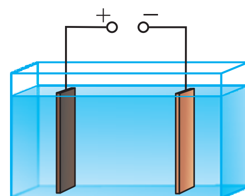
Працэс гальванапластыкі быў распрацаваны ў 1836 г. рускім акадэмікам Б. С. Якобі (1801—1874).

3. Атрыманне металаў з расплаўленых руд і іх ачыстка, электрахімічная апрацоўка металаў.

Працэс ачысткі металаў адбываецца ў электралітычнай ванне. Анодам служыць метал, які падлягае ачыстцы, катодам — тонкая пласціна з чыстага металу, а электралітам — раствор солі дадзенага металу. Напрыклад, пласціну з неачышчанай медзі змяшчаюць у якасці анода ў ванну з растворам меднага купарвасу, дзе катодам з'яўляецца ліст чыстай медзі (рыс. 143). У забруджаных металах могуць змяшчацца каштоўныя прымесі. Так, медзь часта змяшчае нікель і серабро. Пры прапусканні праз ванну электрычнага току медзь з анода пераходзіць у раствор, з раствору на катодзе выдзяляецца чыстая медзь, а прымесі выпадаюць у выглядзе асадку або пераходзяць у раствор.



Рыс. 142



Рыс. 143

1. Электралітамі называюць рэчывы, растворы або расплавы якіх праводзяць электрычны ток.

2. Электрычны ток у электралітах уяўляе сабой упарадкаваны рух іонаў, якія ўтвараюцца ў выніку электралітычнай дысацыяцыі раствора-нага рэчыва. Праводнасць электралітаў з'яўляецца іоннай.

3. Працэс выдзялення рэчыва на электродзе, звязаны з акісляльна-аднаўленчымі рэакцыямі, якія адбываюцца пры праходжанні электрычнага току праз растворы (расплавы) электралітаў, называюць электролізам.

4. Маса рэчыва, якое выдзелілася на электродзе, прама прапарцыянальная электрычнаму зараду, што прайшоў праз электраліт:

$$m = kq.$$

?

1. Што называюць электралітам?

2. Які працэс называюць электролізам?

3. Якая прырода электрычнага току ў электралітах?

4. Ад чаго залежыць супраціўленне электралітаў?

5. Сфармулюйце першы закон электролізу. Які фізічны сэнс электрахімічнага эквіваленту?

6. Праз электралітычную ванну, напоўненую растворам сульфату медзі(II) $CuSO_4$, прапускаюць электрычны ток. Ці зменіцца маса медзі, якая выдзяляецца на катодзе за аднолькавыя прамежкі часу, калі павялічыць напружанне паміж электродамі? павялічыць тэмпературу раствору электраліту? павялічыць канцэнтрацыю раствору электраліту? Чаму?

7. Чаму небяспечна дакранацца голымі рукамі да неізаляваных металічных правадоў, па якіх праходзіць электрычны ток?

8. Пры нікеліраванні прадметаў у якасці анода выкарыстоўваюць пласціну з нікелю. Ці будзе асядаць нікель з раствору нікелевай солі на прадмеце, калі ў якасці анода выкарыстаць пласціну з якога-небудзь іншага металу?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Праз электралітычную ванну, якая змяшчае раствор сернай кіслаты, на працягу прамежку часу $t = 60{,}0$ мін праходзіў ток сілай $I = 1{,}20$ А. Газападобны вадарод, які выдзеліўся на катодзе, сабраны ў пасудзіне ўмяшчальнасцю $V = 350$ см^3. Вызначце тэмпературу вадароду, калі яго ціск $p = 150$ кПа.

Дадзена:
$t = 60{,}0$ мін $= 3{,}60 \cdot 10^3$ с
$I = 1{,}20$ А
$V = 350$ см$^3 = 3{,}50 \cdot 10^{-4}$ м^3
$p = 150$ кПа $= 1{,}50 \cdot 10^5$ Па

T — ?

Рашэнне. Для знаходжання тэмпературы вадароду выкарыстаем ураўненне Клапейрона — Мендзялеева

$$pV = \frac{m}{M}RT,$$

дзе M — малярная маса вадароду ($M = 2{,}00 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$), R — універсальная газавая пастаянная ($R = 8{,}31\ \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$). Значыць, $T = \frac{pVM}{Rm}$.

Масу вадароду, які выдзеліўся на катодзе, знойдзем, выкарыстаўшы закон электролізу $m = kIt$, дзе k — электрахімічны эквівалент вадароду $\left(k = 1{,}04 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}\right)$. З улікам гэтага тэмпературу вадароду вызначым па формуле $T = \frac{pVM}{RkIt}$.

$$T = \frac{1{,}50 \cdot 10^{5}\ \text{Па} \cdot 3{,}50 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^3 \cdot 2{,}00 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{8{,}31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 1{,}04 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot 1{,}20\ \text{А} \cdot 3{,}60 \cdot 10^{3}\ \text{с}} = 281\ \text{К}.$$

Адказ: $T = 281$ К.

Прыклад 2. Храміраванне тонкай прамавугольнай пласцінкі даўжынёй $a = 3{,}0$ см і шырынёй $b = 5{,}0$ см у вялікай гальванічнай ванне ажыццяўляецца на працягу прамежку часу $t = 2{,}0$ гадз пры сіле току $I = 1{,}5$ А. Вызначце таўшчыню слоя хрому, які ўтварыўся на пласцінцы. Шчыльнасць хрому $\rho = 7{,}18 \cdot 10^{3}\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Дадзена:
$a = 3{,}0$ см $= 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ м
$b = 5{,}0$ см $= 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ м
$t = 2{,}0$ гадз $= 7{,}2 \cdot 10^{3}$ с
$I = 1{,}5$ А
$\rho = 7{,}18 \cdot 10^{3}\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

h — ?

Рашэнне. Для вызначэння масы хрому, які асеў на двух баках пласцінкі, выкарыстаем закон Фарадэя $m = kIt$, дзе $k = 1{,}8 \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

З другога боку, масу хрому можна выразіць праз шчыльнасць ρ і аб'ём V: $m = \rho V = \rho ab2h$, дзе h — таўшчыня слоя хрому, які ўтварыўся на пласцінцы.

З улікам гэтага $2\rho abh = kIt$, адкуль таўшчыня слоя хрому $h = \frac{kIt}{2\rho ab}$.

$$h = \frac{1{,}8 \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot 1{,}5\ \text{А} \cdot 7{,}2 \cdot 10^{3}\ \text{с}}{2 \cdot 7{,}18 \cdot 10^{3}\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м}} = 9{,}0 \cdot 10^{-5}\ \text{м} = 90\ \text{мкм}.$$

Адказ: $h = 90$ мкм.

Практыкаванне 20

1. Нікеліраванне вырабу двухвалентным нікелем ажыццяўлялася на працягу прамежку часу $t = 20$ мін пры сіле току $I = 15$ А. Вызначце масу слоя нікелю, які асеў на вырабе.

2. Праз водны раствор сульфату медзі(II) $CuSO_4$, які знаходзіцца ў электралітычнай ванне, прапускаюць электрычны ток сілай $I = 4{,}0$ А. Вызначце колькасць іонаў медзі, якія штосекундна асядаюць на катодзе ванны.

3. У працэсе электролізу двухвалентным нікелем на катодзе ўтвараецца слой масай $m = 0{,}15$ кг. Вызначце работу, выкананую электрычным токам, калі напружанне паміж электродамі электралітычнай ванны $U = 4{,}0$ В.

4. Электроды, якія знаходзяцца ў растворы сульфату медзі(II) $CuSO_4$, падключаны да крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E} = 12$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 0{,}40$ Ом. Вызначце масу медзі, якая асела на катодзе за прамежак часу $t = 10$ мін, калі супраціўленне раствору паміж электродамі $R = 0{,}60$ Ом.

5. Пры электролізе слабога раствору сернай кіслаты на катодзе электралітычнай ванны выдзеліўся газападобны вадарод аб'ёмам $V = 1{,}5$ л, тэмпература якога $t = 22$ °C і ціск $p = 100$ кПа. Вызначце расход электраэнергіі, калі электроліз адбываўся пры напружанні $U = 6{,}0$ В, а каэфіцыент карыснага дзеяння ўстаноўкі $\eta = 75$ %.

6*. Вызначце пад'ёмную сілу паветранага шара, напоўненага пры нармальных умовах вадародам, які быў атрыманы ў выніку электролізу падкісленай вады, калі электрычны ток сілай $I = 300$ А прапускалі праз электраліт на працягу прамежку часу $t = 1{,}50 \cdot 10^3$ гадз.

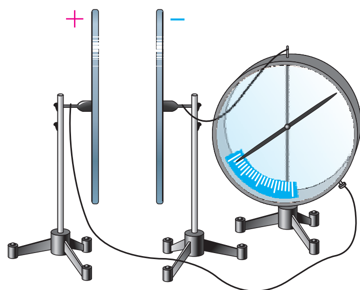
§ 26. Электрычны ток у газах. Самастойны і несамастойны разрады. Плазма

Газы пры нармальных умовах не праводзяць электрычны ток, г. зн. з'яўляюцца дыэлектрыкамі. Гэта абумоўлена тым, што газы складаюцца з нейтральных атамаў (малекул). Аднак пры пэўных умовах газы, у тым ліку і паветра, становяцца праваднікамі. Высветлім, пры якіх умовах гэта магчыма.

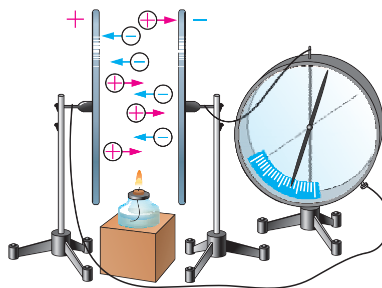
Прырода электрычнага току ў газах. Правядзём дослед, які дазваляе прадэманстраваць змяненне электрычнай праводнасці газу (паветра). Два металічныя дыскі, зараджаныя рознаіменнымі зарадамі і размешчаныя на некаторай

адлегласці адзін ад аднаго, злучым з электрометрам (рыс. 144). Стрэлка электрометра пры гэтым адхіліцца на некаторы вугал. Электрометр не разраджаецца, значыць, пры невялікай рознасці патэнцыялаў паміж дыскамі паветра не праводзіць электрычны ток.

Паўторым дослед, награваючы полымем (спіртоўкі, свечкі) паветраны прамежак паміж дыскамі. Электрометр разраджаецца, г. зн. праз паветра праходзіць электрычны ток (рыс. 145). Вывад відавочны: у паветраным прамежку паміж дыскамі з'явіліся свабодныя носьбіты электрычнага зараду.



Рыс. 144



Рыс. 145

Калі прыбраць полымя, то электрычны ток знікне, г. зн. паветра паміж дыскамі зноў стане дыэлектрыкам.

Растлумачым вынікі разгледжанага доследу. Награванне газу полымем прыводзіць да ўзнікнення свабодных электронаў і дадатна зараджаных іонаў. Працэс, у выніку якога некаторыя атамы (малекулы) газу страчваюць электроны і ператвараюцца ў дадатна зараджаныя іоны, называюць *іанізацыяй газу*. Мінімальнае значэнне энергіі, неабходнай для адрыву электрона ад атама (малекулы), называюць *энергіяй іанізацыі* атама (малекулы). Разам з іанізацыяй можа адбывацца далучэнне ўтвораных пры адрыве электронаў да нейтральных атамаў (малекул) газу. Гэта прыводзіць да ўтварэння адмоўна зараджаных іонаў.

Пад уздзеяннем электрычнага поля ў газе ўзнікае накіраваны рух дадатна зараджаных іонаў да адмоўнага электрода (катода) і накіраваны рух электронаў і адмоўна зараджаных іонаў да дадатнага электрода (анода). Такім чынам, носьбітамі электрычнага зараду ў іанізаваных газах з'яўляюцца дадатна і адмоўна зараджаныя іоны і свабодныя электроны. Значыць, праводнасць газаў — *іонна-электронная*. Праходжанне электрычнага току праз іанізаваны газ называюць *газавым разрадам*.

Пасля спынення знешняга ўздзеяння (у дадзеным выпадку награвання полымем) электрычны ток у газе знікае. Гэта абумоўлена тым, што пры сутыкненні

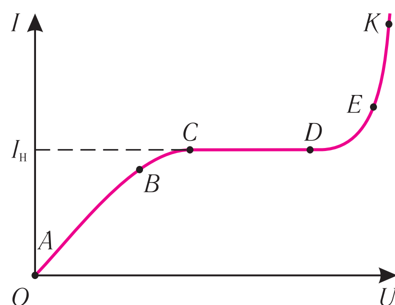
дадатна зараджанага іона з электронам яны ўтвараюць нейтральны атам (малекулу) газу. Іоны розных знакаў пры сутыкненні таксама ператвараюцца ў нейтральныя атамы (малекулы). Гэтыя працэсы называюць *рэкамбінацыяй* іонаў. Пры рэкамбінацыі вызваляецца энергія, роўная энергіі, затрачанай на іанізацыю.

Такім чынам, для таго каб у газе з'явіліся свабодныя носьбіты электрычнага зараду, яго атамы (малекулы) неабходна іанізаваць. Гэта можна ажыццявіць шляхам награвання газу да высокай тэмпературы, уздзеяння на газ ультрафіялетавым, рэнтгенаўскім, радыёактыўным выпраменьваннем і інш.

Знешнія ўздзеянні, у выніку якіх адбываецца іанізацыя, называюць *іанізатарамі*. Разрад, які ўзнікае ў выніку іанізацыі газу пад уздзеяннем знешняга іанізатара, называюць *несамастойным*.

Вольт-амперная характарыстыка газавага разраду. Для вывучэння разраду ў газе зручна выкарыстоўваць шкляную трубку з двума электродамі. Разгледзім залежнасць сілы току ў газе ад напружання, прыкладзенага да электродаў трубкі, — вольт-амперную характарыстыку газавага разраду (рыс. 146).

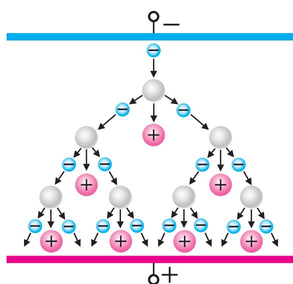
У выніку дзеяння знешняга іанізатара адбываецца іанізацыя газу ў прасторы паміж электродамі. Адначасова з гэтым адбываецца і адваротны працэс — ператварэнне іонаў у нейтральныя атамы (малекулы). Пры невялікім напружанні паміж электродамі нязначная колькасць утвораных іонаў і электронаў дасягае электродаў, ствараючы электрычны ток. Большасць іонаў рэкамбінуе, не паспяваючы дасягнуць электродаў. Пры павелічэнні напружання паміж электродамі ўзрастае колькасць зараджаных часціц, якія дасягнулі электродаў, г. зн. сіла току павялічваецца. Пры гэтым сіла току прама прапарцыянальная прыкладзенаму напружанню, г. зн. выконваецца закон Ома (участак графіка AB).



Рыс. 146

Пры далейшым павышэнні напружання прапарцыянальнасць парушаецца (участак BC). Пачынаючы з некаторага значэння напружання (пункт C) усе носьбіты электрычнага зараду, якія ўтварыліся пад уздзеяннем іанізатара, дасягаюць электродаў, не паспеўшы рэкамбінаваць. Пры гэтым сіла току прымае максімальнае значэнне і не залежыць ад напружання (участак графіка CD). Электрычны ток, сіла якога не залежыць ад напружання, называюць *токам насычэння*.

Пры даволі высокім напружанні свабодныя электроны пад уздзеяннем электрычнага поля паскараюцца і набываюць кінетычную энергію, дастатко-



Рыс. 147

вую для іанізацыі атамаў (малекул) газу пры сутыкненнях з імі. Працэс адрыву ад атама (малекулы) газу аднаго або некалькіх электронаў, выкліканы сутыкненнем з гэтымі атамамі (малекуламі) свабодных электронаў, называюць *іанізацыяй электронным ударам*. Свабодныя электроны, якія ўзніклі ў выніку ўдарнай іанізацыі, паскараюцца электрычным полем і выклікаюць іанізацыю новых часціц. Такія свабодныя электроны з'яўляюцца другасным іанізатарам. Гэта вядзе да лавінападобнага нарастання колькасці другасных свабодных электронаў і дадатна зараджаных іонаў (рыс. 147), а значыць, і да павелічэння сілы разраднага току. Аднак сам разрад усё яшчэ застаецца несамастойным, паколькі пасля спынення дзеяння знешняга іанізатара ён працягваецца толькі да таго часу, пакуль адмоўна зараджаныя іоны і ўсе электроны (першасныя і другасныя) не дасягнуць анода, а дадатна зараджаныя іоны — катода. Несамастойнаму лавінападобнаму разраду ў газе адпавядае ўчастак графіка *DE* на рысунку 146.

Аднак у шэрагу выпадкаў газавы разрад можа існаваць і пасля спынення дзеяння знешняга іанізатара. У гэтым выпадку моцнае электрычнае поле, што існуе паміж электродамі, з'яўляецца прычынай захавання газавага разраду, які называюць *самастойным*.

Для ўзнікнення самастойнага разраду недастаткова наяўнасці аднаго толькі працэсу ўдарнай іанізацыі. Для падтрымання разраду неабходна, каб у газе пастаянна ўзнікалі носьбіты электрычнага зараду без дзеяння знешняга іанізатара. Пры руху дадатна зараджаных іонаў да катода іх кінетычная энергія пад уздзеяннем поля павялічваецца. Калі энергія іонаў дастаткова вялікая, то пры ўдары аб катод яны могуць выбіваць з яго паверхні электроны. Гэты працэс называюць *другаснай электроннай эмісіяй* («эмісія» азначае «выпусканне»). Пры бамбардзіроўцы дадатна зараджанымі іонамі катода адбываецца яго награванне. Пры высокай тэмпературы катода адбываецца выпусканне электронаў з яго паверхні. Такі працэс называюць *тэрмаэлектроннай эмісіяй*. У выніку гэтых працэсаў у газе ўтвараецца значная колькасць свабодных электронаў. У залежнасці ад ціску газу, яго тэмпературы і напружанасці электрычнага поля другасная электронная эмісія і тэрмаэлектронная эмісія могуць адбывацца адначасова (участак графіка *EK* на рысунку 146). Такім чынам, пры адсутнасці знешняга іанізатара самастойны разрад будзе падтрымлівацца за кошт другаснай электроннай эмісіі і (або) тэрмаэлектроннай эмісіі з паверхні катода.

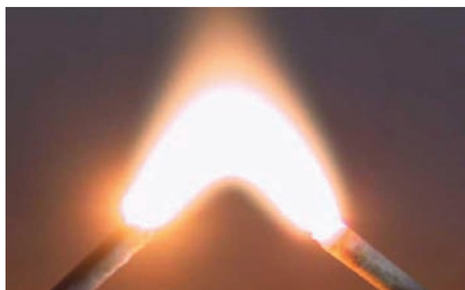
Віды самастойнага газавага разраду і іх прымяненне. У залежнасці ад напружанасці электрычнага поля, ціску газу, формы і рэчыва электродаў адрозніваюць наступныя віды самастойнага газавага разраду: тлеючы, дугавы, каронны і іскравы.

Тлеючы разрад характарызуецца невялікай сілай току (дзясяткі міліампер), адносна высокім напружаннем (дзясяткі і сотні вольт), нізкім ціскам газу (дзясятыя долі міліметра ртутнага слупка). Тлеючы разрад шырока выкарыстоўваюць у розных газасветлавых трубках (рыс. 148), якія прымяняюцца для светлавой рэкламы і дэкарацый, у лямпах дзённага святла (рыс. 149), неонавых лямпах.

Рыс. 148

Рыс. 149

Дугавы разрад уяўляе сабой слуп газу, які ярка свеціцца (рыс. 150). Ён характарызуецца вялікай сілай току (дзясяткі і сотні ампер) і параўнальна невялікім напружаннем (некалькі дзясяткаў вольт). Дугавы разрад з'яўляецца магутнай крыніцай святла. Яго выкарыстоўваюць у асвятляльных установках, для зваркі і рэзкі металаў (рыс. 151), электролізу расплаваў, для плаўкі сталі ў прамысловых электрапечах і інш.



Рыс. 150

Рыс. 151

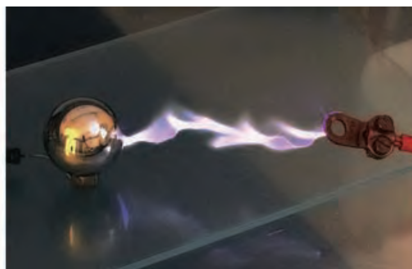
! У 1802 г. прафесар фізікі Пецярбургскай медыка-хімічнай акадэміі В. У. Пятроў атрымаў электрычную дугу. Ён выявіў, што калі далучыць да полюсаў вялікай электрычнай батарэі два кавалачкі драўнянага вугалю, прывесці іх у судотык, а затым трохі рассунуць на невялікую адлегласць, то паміж канцамі вуглёў утварыцца яркае полымя, а самі канцы вуглёў распаляцца дабяла, выпускаючы асляпляльнае святло (электрычнага дуга). Упершыню электрычная дуга была прыменена ў 1876 г. рускім інжынерам П. М. Яблачкавым для вулічнага асвятлення.

Каронны разрад узнікае паблізу завостранай часткі праваднікa пры атмасферным ціску пад уздзеяннем вельмі неаднароднага электрычнага поля. Ён суправаджаецца слабым свячэннем, якое нагадвае карону (рыс. 152) і характэрным трэскам.

Каронны разрад выкарыстоўваюць у электрычных фільтрах для ачысткі прамысловых газаў ад цвёрдых і вадкіх прымесей. Аднак узнікненне каронная разраду вакол высакавольтных ліній электраперадачы непажадана, бо прыводзіць да страт электрычнай энергіі.

Іскравы разрад назіраюць пры высокім напружанні (рыс. 153). Ён суправаджаецца яркім свячэннем газу, гукавым эфектам, які стварaецца рэзкім павышэннем ціску. Прыкладам іскравога разраду ў прыродзе з'яўляецца маланка (рыс. 154).

Рыс. 152



Рыс. 153

Рыс. 154

! Перад з'яўленнем маланкі напружанне паміж воблакам і паверхняй Зямлі дасягае $U \sim 10^8$—10^9 В. Сіла току ў маланцы складае $I \sim 10^5$ А, працягласць разраду маланкі $t \sim 10^{-6}$ с, дыяметр светлавога канала $d \sim 10$—20 см. Звілісты выгляд маланкі тлумачыцца тым, што электрычны разрад праходзіць праз участкі паветра, якія маюць найменшае супраціўленне. А такія ўчасткі размешчаны ў паветры выпадковым чынам.

Плазма. Пры даволі высокіх тэмпературах або пад уздзеяннем электрамагнітнага выпраменьвання адбываецца іанізацыя газу. Цалкам або часткова іанізаваны газ, у якім канцэнтрацыя дадатных і адмоўных зарадаў практычна супадае, называюць *плазмай*. Плазма — самы распаўсюджаны стан рэчыва ў Сусвеце (рыс. 155).

Рыс. 155

У залежнасці ад ступені іанізацыі адрозніваюць часткова іанізаваную і цалкам іанізаваную плазму. У залежнасці ад скорасці хаатычнага руху зараджаных часціц адрозніваюць халодную ($T < 10^5$ К) і гарачую ($T > 10^6$ К) плазму. Прыкладам халоднай плазмы з'яўляецца плазма, якая ўтвараецца пры ўсіх відах электрычнага разраду ў газах. Зоркі ўяўляюць сабой гіганцкія згусткі гарачай плазмы. Плазма запаўняе касмічную прастору паміж зоркамі і галактыкамі. Шчыльнасць плазмы ў касмічнай прасторы вельмі малая, у сярэднім адна часціца на кубічны сантыметр. У адрозненне ад гарачай плазмы зорак тэмпература міжзоркавай плазмы вельмі нізкая. Верхні слой атмасферы Зямлі таксама ўяўляе сабой слаба іанізаваную плазму. Прычынай іанізацыі з'яўляецца ўльтрафіялетавае і рэнтгенаўскае выпраменьванне Сонца і іншых зорак, хуткія зараджаныя часціцы і інш.

Незалежна ад спосабу атрымання плазма ў цэлым з'яўляецца электрычна нейтральнай, паколькі змяшчае роўную колькасць дадатных і адмоўных зарадаў. Праводнасць плазмы расце з павелічэннем колькасці іанізаваных атамаў (малекул). Цалкам іанізаваная плазма па сваёй праводнасці набліжаецца да звышправаднікоў.

1. Носьбітамі электрычнага зараду ў іанізаваных газах з'яўляюцца дадатна і адмоўна зараджаныя іоны і свабодныя электроны.

2. Праходжанне электрычнага току праз іанізаваны газ называюць газавым разрадам.

3. Разрад, які ўзнікае ў выніку іанізацыі газу пад уздзеяннем знешняга іанізатара, называюць несамастойным. Разрад, які адбываецца ў выніку іанізацыі газу пасля спынення дзеяння знешняга іанізатара, называюць самастойным.

4. Іанізацыя электронным ударам — працэс адрыву ад атама (малекулы) газу аднаго або некалькіх электронаў, выкліканы сутыкненнямі з атамамі (малекуламі) газу электронаў.

5. Плазма — цалкам або часткова іанізаваны газ, у якім канцэнтрацыя дадатных і адмоўных зарадаў аднолькавая.

?

1. Якая прырода электрычнага току ў газах?

2. Як можна павялічыць электрычную праводнасць газаў?

3. Які разрад называюць несамастойным?

4. Які механізм узнікнення несамастойнага разраду ў газах?

5. Што такое іанізацыя электронным ударам? Пры якіх умовах яна адбываецца ў газах?

6. Які разрад называюць самастойным?

7. Які механізм узнікнення самастойнага разраду ў газах?

8. Якія віды самастойнага разраду вы ведаеце? Прывядзіце прыклады іх выкарыстання.

9. Што такое плазма? Як яе можна атрымаць?

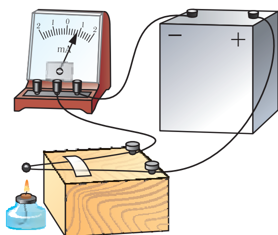
§ 27. Электрычны ток у паўправадніках. Уласная праводнасць паўправаднікоў

Паўправаднікі — шырокі клас як неарганічных, так і арганічных рэчываў у цвёрдым або вадкім стане, удзельнае супраціўленне якіх знаходзіцца ў межах ад 10^{-6} да 10^{8} Ом·м (пры $T = 300$ К) і істотна змяншаецца пры павелічэнні тэмпературы, а таксама змяняецца пры змене асвятлення і ўвядзенні параўнальна невялікай колькасці прымесей. Да паўправаднікоў адносяць шэраг хімічных элементаў (бор, вуглярод, крэмній, германій, фосфар, мыш'як, сурму, серу, сялен, тэлур і інш.), мноства аксідаў і сульфідаў металаў, а таксама іншых хімічных злучэнняў.

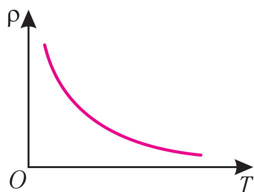
Залежнасць супраціўлення паўправаднікоў ад тэмпературы і асветленасці. Вывучыць уласцівасці паўправаднікоў можна шляхам доследаў. Збяром электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, паўправадніка і міліамперметра (рыс. 156). Дослед паказвае, што пры награванні паўправадніка сіла току ў ланцугу ўзрастае. Узрастанне сілы току абумоўлена тым, што пры павелічэнні тэмпературы супраціўленне паўправадніка памяншаецца. Прычым

у адрозненне ад металаў залежнасць супраціўлення паўправаднікоў ад тэмпературы з'яўляецца нелінейнай. З паніжэннем тэмпературы супраціўленне металаў памяншаецца, а паўправаднікоў узрастае і паблізу абсалютнага нуля становіцца такім жа вялікім, як у дыэлектрыкаў. Графік залежнасці ўдзельнага супраціўлення ад тэмпературы чыстага (без прымесей) паўправадніка прыведзены на рысунку 157.

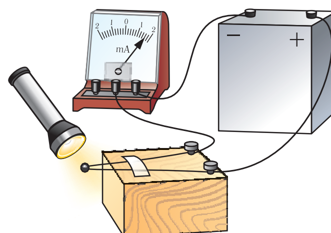
Правядзём яшчэ адзін дослед. Змяняючы асветленасць паверхні паўправадніка, назіраем змяненне паказанняў міліамперметра (рыс. 158). Вынікі назіранняў сведчаць аб тым, што пры асвятленні паверхні паўправадніка яго супраціўленне памяншаецца.



Рыс. 156



Рыс. 157



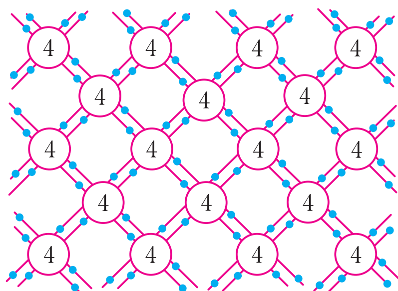
Рыс. 158

Такім чынам, паменшыць супраціўленне паўправадніка можна, або награваючы яго, або ўздзейнічаючы электрамагнітным выпраменьваннем, напрыклад, асвятляючы яго паверхню.

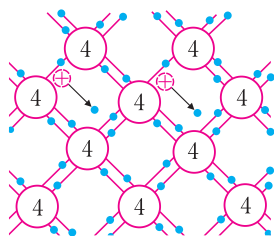
Прырода электрычнага току ў паўправадніках. Эксперыментальна ўстаноўлена, што пры праходжанні электрычнага току ў паўправадніках, як і ў металах, ніякіх хімічных змяненняў не адбываецца, г. зн. перанос зараду пры праходжанні току не суправаджаецца пераносам рэчыва. Гэта сведчыць аб тым, што свабоднымі носьбітамі электрычнага зараду ў паўправадніках, як і ў металах, з'яўляюцца электроны.

Разгледзім механізм праводнасці паўправаднікоў на прыкладзе крышталя германію Ge, валентнасць атамаў якога роўная чатыром.

Атамы германію на знешняй абалонцы маюць чатыры валентныя электроны, параўнальна слаба звязаныя з ядром. Пры гэтым кожны атам крышталя звязаны з чатырма суседнімі атамамі кавалентнымі сувязямі. Два суседнія атамы аб'ядноўваюць два свае валентныя электроны (па адным ад кожнага атама), якія ўтвараюць электронную пару. Таму ўсе валентныя электроны



Рыс. 159



Рыс. 160

атама германію ўдзельнічаюць ва ўтварэнні кавалентных сувязей. На рысунку 159 адлюстравана плоская схема прасторавай рашоткі крышталя германію. Пры тэмпературах, блізкіх да абсалютнага нуля, кавалентныя сувязі германію дастаткова трывалыя, таму свабодныя электроны адсутнічаюць, і германій з'яўляецца дыэлектрыкам.

Для таго каб разарваць кавалентную сувязь і зрабіць электрон свабодным, крышталю германію неабходна перадаць некаторую энергію, напрыклад, награваючы крышталь або апраменьваючы яго паверхню. Пры гэтым частка электронаў атрымлівае энергію, дастатковую для таго, каб пакінуць атамы і стаць свабоднымі.

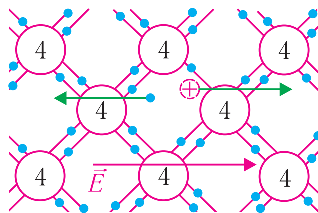
Нейтральны атам, якому належаў вызвалены электрон, становіцца дадатна зараджаным іонам, а ў кавалентных сувязях утвараецца вакантнае месца з адсутным электронам. Яго называюць *дзіркай* (рыс. 160).

Адначасова з працэсам узнікнення свабодных электронаў і дзірак адбываецца працэс, пры якім адзін з электронаў (не свабодны, а той, што забяспечвае кавалентную сувязь) пераскоквае на месца ўтворанай дзіркі і аднаўляе кавалентную сувязь. Пры гэтым становішча дзіркі змяняецца, што можна мадэляваць як яе перамяшчэнне. Такім чынам, пры адсутнасці знешняга электрычнага поля ў крышталі паўправадніка назіраецца хаатычнае перамяшчэнне свабодных электронаў і дзірак, канцэнтрацыі якіх у чыстым паўправадніку аднолькавыя.

Дзіркі лічаць рухомымі носьбітамі дадатнага зараду, які роўны модулю зараду электрону.

Дзірачная праводнасць у рэчаіснасці абумоўлена «эстафетным» перамяшчэннем па вакансіях ад аднаго атама крышталя паўправадніка да другога электронаў, якія ажыццяўляюць кавалентную сувязь. Дзірак як дадатных зарадаў, якія існуюць рэальна, на самай справе няма. Тым не менш уяўленне пра іх з'яўляецца добрай фізічнай мадэллю, якая дае магчымасць разглядаць электрычны ток у паўправадніках на аснове законаў фізікі.

Пры наяўнасці знешняга электрычнага поля на хаатычны рух свабодных электронаў і дзірак накладваецца іх упарадкаваны рух, г. зн. узнікае электрычны ток. Прычым рух свабодных электронаў адбываецца ў напрамку, супрацьлеглым напрамку напружанасці $\vec{E}$ знешняга электрычнага поля, а рух дзірак супадае з напрамкам напружанасці $\vec{E}$ поля (рыс. 161).



Рыс. 161

Праводнасць, абумоўленая рухам свабодных электронаў і дзірак у чыстым паўправадніку, называюць *уласнай праводнасцю* паўправадніка. Пры перадачы паўправадніку энергіі канцэнтрацыя свабодных электронаў, а значыць, і дзірак узрастае, паколькі павялічваецца колькасць разрываў кавалентных сувязей. Гэтым і тлумачыцца памяншэнне супраціўлення паўправадніка пры яго награванні і апраменьванні.

Тэхнічнае прымяненне паўправаднікоў. Прыборы, работа якіх заснавана на ўласцівасці паўправаднікоў змяняць сваё супраціўленне пры змене тэмпературы, называюць тэрмістарамі або тэрмарэзістарамі.

Тэрмарэзістары (рыс. 162) выкарыстоўваюць для аховы тэлефонных станцый і ліній ад токавых перагрузак, для пускаахоўных рэле кампрэсараў халадзільнікаў; запальвання люмінесцэнтных лямп; для падагрэву дызельнага паліва; у розных электранагравальных прыборах: награвальных рашотках цеплавентылятараў, сушылках для абутку.

Рыс. 162

Прыборы, работа якіх заснавана на ўласцівасці паўправаднікоў змяняць сваё супраціўленне пры змене асветленасці іх паверхні, называюць фотарэзістарамі або фотасупраціўленнямі (рыс. 163). Іх выкарыстоўваюць для рэгістрацыі слабых патокаў святла, пры сартаванні і падліку гатовай прадукцыі, для кантролю якасці і гатоўнасці самых розных дэталей; у паліграфічнай прамысловасці для выяўлення абрываў папяровай стужкі, кантролю за колькасцю лістоў паперы, што падаюцца ў друкарскую машыну; у медыцыне, сельскай гаспадарцы і іншых галінах.

Рыс. 163

1. Электрычны ток у паўправадніках уяўляе сабой упарадкаваны рух свабодных электронаў і дзірак.

2. Праводнасць, абумоўленую рухам свабодных электронаў і дзірак у чыстым паўправадніку, называюць уласнай праводнасцю паўправадніка.

3. Супраціўленне паўправаднікоў памяншаецца пры павелічэнні тэмпературы і ўздзеянні электрамагнітнага выпраменьвання.

?

1. Якая будова паўправаднікоў (на прыкладзе крышталя германію)?

2. Якая прырода электрычнага току ў паўправадніках?

3. Растлумачце механізм уласнай праводнасці паўправаднікоў.

4. Як залежыць супраціўленне паўправаднікоў ад тэмпературы? асветленасці? Чаму?

5. Ці можа назірацца ў паўправадніках з'ява звышправоднасці? Чаму?

6. У чым адрозненне залежнасці электрычнай праводнасці металічных праваднікоў, паўправаднікоў і дыэлектрыкаў ад тэмпературы? Чаму?

7. У якім выпадку паўправаднік можа праяўляць уласцівасці дыэлектрыка?

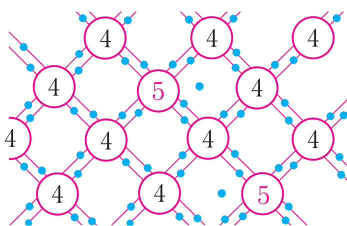
8. Прывядзіце прыклады выкарыстання паўправадніковых прыбораў.

§ 28. Прымесная праводнасць паўправаднікоў. Электронна-дзірачны пераход

Змяніць уласцівасці паўправаднікоў можна не толькі награваннем або ўздзеяннем электрамагнітнага выпраменьвання, але і дабаўленнем у чысты паўправаднік прымесей. Тады ў паўправадніку разам з уласнай праводнасцю ўзнікае прымесная праводнасць.

Прымесная праводнасць паўправаднікоў. Праводнасць, абумоўленую наяўнасцю прымесей у паўправадніку, называюць *прымеснай праводнасцю* паўправадніка.

Разгледзім механізм гэтай праводнасці на прыкладзе крышталя германію Ge, які змяшчае прымесь атамаў мыш'яку As, валентнасць якіх роўная пяці.



Рыс. 164

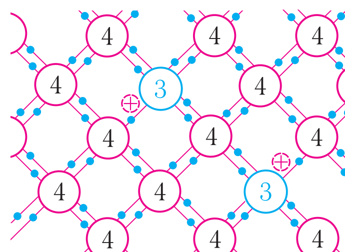
Чатыры валентныя электроны атама мыш'яку ўтвараюць кавалентныя сувязі з суседнімі атамамі германію (рыс. 164). Пятыя электроны атамаў мыш'яку не задзейнічаны ва ўтварэнні кавалентных сувязей і могуць свабодна пера-

мяшчацца, амаль як электроны ў металічным правадніку. Праводнасць такога крышталя будзе пераважна электроннай. Дзіркі, якія ўтвараюцца ў выніку разрыву асобных кавалентных сувязей паміж атамамі германію, з'яўляюцца неасноўнымі носьбітамі электрычнага зараду, паколькі іх канцэнтрацыя малая ў параўнанні з канцэнтрацыяй свабодных электронаў. Такія паўправаднікі называюць *электроннымі паўправаднікамі* або *паўправаднікамі n-тыпу* (ад лац. *negativ* — адмоўны).

Прымесі, якія пастаўляюць у паўправадніку свабодныя электроны без узнікнення роўнай ім колькасці дзірак, называюць *донарнымі* (аддаючымі). Удзельнае супраціўленне паўправадніка з утрыманнем такіх прымесей рэзка змяншаецца і можа набліжацца да ўдзельнага супраціўлення металічнага правадніка.

Цяпер разгледзім механізм прымеснай праводнасці паўправадніка на прыкладзе крышталя германію Ge, які змяшчае прымесь атамаў індыю In, валентнасць якіх роўная тром.

Валентныя электроны атама індыю ўтвараюць кавалентныя сувязі толькі з трыма суседнімі атамамі германію (рыс. 165). На ўтварэнне сувязі з чацвёртым атамам германію ў атама індыю электрона няма. Таму каля кожнага атама індыю адна з кавалентных сувязей будзе незапоўненай, г. зн. узнікае дзірка. Электрон, які адсутнічае, можа быць захоплены атамам індыю з кавалентнай сувязі суседніх атамаў германію. Пры гэтым дзірка ўтвараецца на тым месцы, дзе раней знаходзіўся электрон.



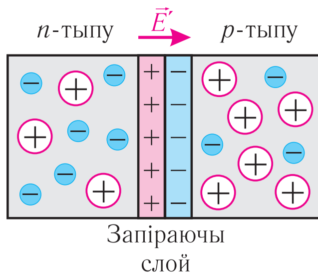
Рыс. 165

У выніку ўвядзення такой прымесі ў крышталі разрываецца мноства кавалентных сувязей і ўтвараюцца дзіркі. Праводнасць такога крышталя будзе пераважна дзірачнай. Свабодныя электроны, якія ўзнікаюць за кошт уласнай праводнасці паўправадніка, з'яўляюцца неасноўнымі носьбітамі электрычнага зараду, паколькі іх канцэнтрацыя малая ў параўнанні з канцэнтрацыяй дзірак. Такія паўправаднікі называюць *дзірачнымі паўправаднікамі* або *паўправаднікамі p-тыпу* (ад лац. *positiv* — дадатны).

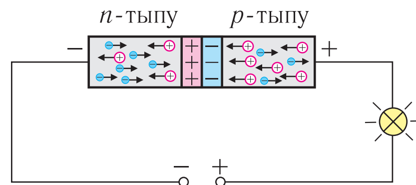
Прымесі, наяўнасць якіх у паўправадніку прыводзіць да ўтварэння дзірак, не павялічваючы пры гэтым колькасці свабодных электронаў, называюць *акцэптарнымі* (прымаючымі). Удзельнае супраціўленне паўправаднікоў, якія змяшчаюць акцэптарныя прымесі, таксама рэзка змяншаецца.

Электронна-дзірачны пераход. Разгледзім паўправаднік, адна частка якога змяшчае донарную прымесь і таму з'яўляецца паўправаднікам n-тыпу, а другая — акцэптарную прымесь і з'яўляецца паўправаднікам p-тыпу. У зоне кантакту ўтвараецца тонкі слой, які называюць электронна-дзірачным пераходам або $n-p$-пераходам. Канцэнтрацыя свабодных электронаў у n-вобласці значна вышэйшая, чым у p-вобласці, адпаведна канцэнтрацыя дзірак у p-вобласці значна большая за іх канцэнтрацыю ў n-вобласці. З-за таго, што праз мяжу падзелу адбываецца дыфузія электронаў з n- у p-вобласць і дыфузія дзірак з p- у n-вобласць, на мяжы n- і p-абласцей з'яўляецца электрычнае поле. Яно перашкаджае далейшаму пераходу асноўных носьбітаў зараду праз мяжу падзелу. Іншымі словамі, у зоне пераходу паміж паўправаднікамі n- і p-тыпаў утвараецца запіраючы слой (рыс. 166).

Збяром электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, лямпачкі і паўправадніка з $n-p$-пераходам. Пры гэтым дадатны полюс крыніцы току падключым да p-вобласці, а адмоўны — да n-вобласці (рыс. 167). Пры замыканні ланцуга лямпачка будзе свяціцца. Вывад відавочны: у ланцугу праходзіць электрычны ток.



Рыс. 166



Рыс. 167

Растлумачым з'яву, якую назіралі. У выніку дзеяння электрычнага поля, створанага крыніцай току, запіраючы слой пачне знікаць, паколькі напружанасць $\vec{E}$ знешняга электрычнага поля крыніцы супрацьлеглая па напрамку напружанасці $\vec{E}'$ поля запіраючага слоя і практычна цалкам кампенсуе яе. Гэта прыводзіць да аднаўлення дыфузіі асноўных носьбітаў зараду праз $n-p$-пераход: з вобласці n у вобласць p — электронаў, а з вобласці p у вобласць n — дзірак. Пры гэтым таўшчыня $n-p$-пераходу памяншаецца, значыць, памяншаецца і яго супраціўленне (рыс. 168). У гэтым выпадку $n-p$-пераход уключаны ў прамым (прапускным) напрамку.

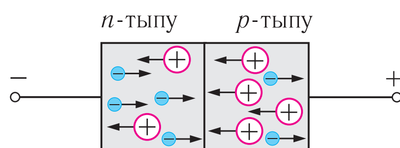
А цяпер падключым дадатны полюс крыніцы току да n-вобласці, а адмоўны — да p-вобласці (рыс. 169). Пры замыканні ланцуга лямпачка не

свеціцца, г. зн. электрычнага току ў ланцугу няма.

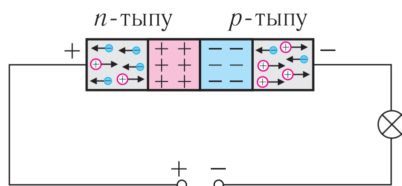
Прычына ў тым, што таўшчыня запіраючага слоя і, значыць, яго супраціўленне павялічваюцца, паколькі напрамак напружанасці $\vec{E}$ электрычнага поля, створанага крыніцай, супадае з напрамкам напружанасці $\vec{E}'$ поля запіраючага слоя. У гэтым выпадку $n-p$-пераход уключаны ў адваротным (запіраючым) напрамку і ток праз $n-p$-пераход практычна адсутнічае (калі не ўлічваць ток, створаны неасноўнымі носьбітамі, канцэнтрацыя якіх малая ў параўнанні з канцэнтрацыяй асноўных носьбітаў току).

Такім чынам, $n-p$-пераход у паўправадніку валодае аднабаковай праводнасцю. На рысунку 170 прадстаўлена вольт-амперная характарыстыка прамога пераходу — участак OB і адваротнага пераходу — участак OA.

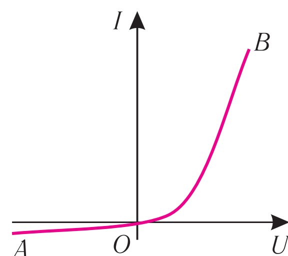
Паўправадніковы дыёд. Уласцівасць аднабаковай праводнасці $n-p$-пераходу выкарыстоўваюць у паўправадніковых прыборах, якія называюць дыёдамі. Для атрымання $n-p$-пераходу бяруць, напрыклад, крышталь германію з донарнай прымессю. Такі крышталь валодае электроннай праводнасцю (або праводнасцю n-тыпу). Калі ў адну з паверхняў крышталя германію ўплавіць індый, то з прычыны дыфузіі атамаў індыю ў паверхневым слоі германію ўтворыцца вобласць з праводнасцю p-тыпу. Тая частка крышталя, у якую атамы індыю не праніклі, па-ранейшаму мае праводнасць n-тыпу. Паміж дзвюма абласцямі з праводнасцямі розных тыпаў узнікае $n-p$-пераход (рыс. 171). У паўправадніковым дыёдзе германій служыць катодам, а індый — анодам. Схематычнае абазначэнне дыёда прыведзена на рысунку 172.



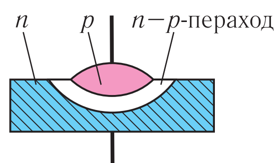
Рыс. 168



Рыс. 169



Рыс. 170



Рыс. 171

Рыс. 172

Рыс. 173

Для аховы ад знешніх уздзеянняў крышталь германію змяшчаюць у герметычны металічны або шкляны корпус (рыс. 173).

У паўправадніковых дыёдаў высокі каэфіцыент карыснага дзеяння, яны даўгавечныя і мініяцюрныя па памерах. Да недахопаў паўправадніковых дыёдаў адносіцца тое, што яны могуць працаваць у абмежаваным інтэрвале тэмператур (ад −70 °C да 125 °C).

Паўправадніковыя дыёды з'яўляюцца асноўнымі элементамі выпрамнікоў пераменнага току і дэтэктараў электрамагнітных сігналаў. З дапамогай паўправадніковых дыёдаў можна ажыццявіць непасрэднае ператварэнне энергіі электрамагнітнага выпраменьвання ў электрычную энергію. Такія дыёды называюць фотадыёдамі (рыс. 174). Калі да выхадаў фотадыёда падключыць, напрыклад, рэзістар, то ў электрычным ланцугу праходзіць электрычны ток, які ўзнікае ў выніку дыфузіі праз $n-p$-пераход неасноўных носьбітаў электрычнага зараду, што ўтвараюцца пад уздзеяннем выпраменьвання, якое падае на фотадыёд. Прычым сіла электрычнага току, што праходзіць праз фотадыёд, лінейна залежыць ад інтэнсіўнасці святла, якое на яго падае. У дадзеным рэжыме фотадыёд «працуе» як крыніца току (сонечная батарэя). Калі фотадыёд уключаны ў адваротным напрамку, то ён «працуе» як фотарэзістар і яго можна выкарыстоўваць для кіравання токам у электрычным ланцугу. Фотадыёды прымяняюць у вымяральнай тэхніцы, сістэмах аўтаматыкі і інш.

Святловыпраменьваючы дыёд (святлодыёд) — паўправадніковы прыбор, які ператварае электрычную энергію непасрэдна ў светлавое выпраменьванне. Ён уяўляе сабой мініяцюрны паўправадніковы дыёд, змешчаны ў празрысты корпус (рыс. 175). Выкарыстоўваючы святлодыёды, вырабляюць, напрыклад, святлодыёдныя свяцільнікі (рыс. 176).

Рыс. 174

Рыс. 175

Рыс. 176

1. Праводнасць, абумоўленую наяўнасцю прымесей у паўправадніку, называюць прымеснай праводнасцю паўправадніка.

2. Прымесі, якія пастаўляюць у паўправадніку свабодныя электроны без ўзнікнення роўнай ім колькасці дзірак, называюць донарнымі. Паўправаднікі, якія змяшчаюць донарныя прымесі, называюць электроннымі паўправаднікамі або паўправаднікамі *n*-тыпу.

3. Прымесі, наяўнасць якіх у крышталі паўправадніка прыводзіць да ўтварэння дзірак, не павялічваючы пры гэтым колькасці свабодных электронаў, называюць акцэптарнымі. Паўправаднікі, якія змяшчаюць акцэптарныя прымесі, называюць дзірачнымі паўправаднікамі або паўправаднікамі *p*-тыпу.

4. Электронна-дзірачным пераходам або *n–p*-пераходам называюць тонкі слой у зоне кантакту паўправаднікоў *n*- і *p*-тыпу. *n–p*-пераход у паўправадніку валодае аднабаковай праводнасцю.

?

1. Што называюць прымеснай праводнасцю паўправаднікоў?

2. Пры якой умове ў прымесным паўправадніку ўзнікае электронная праводнасць? Прывядзіце прыклады.

3. Пры якой умове ў прымесным паўправадніку ўзнікае дзірачная праводнасць? Прывядзіце прыклады.

4. Якой праводнасцю будзе валодаць германій пры ўвядзенні ў яго невялікай колькасці фосфару? галію? сурмы?

5. Як уплывае на праводнасць металічных праваднікоў, паўправаднікоў і дыэлектрыкаў наяўнасць у іх невялікай колькасці прымесей?

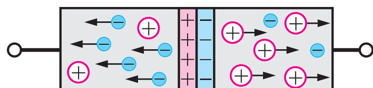
6. Растлумачце, як утвараецца *n–p*-пераход.

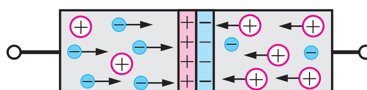
7. Ці можна атрымаць *n–p*-пераход шляхам уплаўлення волава ў германій? Чаму?

8. Вызначце тып праводнасці паўправаднікоў I і II (рыс. 177), калі дыёд уключаны ў адваротным (запіраючым) напрамку.

Рыс. 177

9*. На рысунках 178 і 179 адлюстраваны *n–p*-пераходы двух дыёдаў і напрамак руху асноўных носьбітаў электрычных зарадаў. Вызначце, праз які з дыёдаў праходзіць электрычны ток. Чаму?


Рыс. 178


Рыс. 179

Глава 6

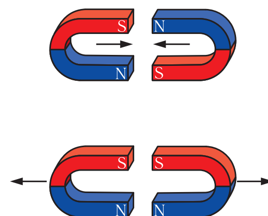
МАГНІТНАЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЯ ІНДУКЦЫЯ

Як вы ўжо ведаеце, паміж зараджанымі целамі (часціцамі), акрамя гравітацыйнага, існуе і электрамагнітнае ўзаемадзеянне. Калі зарады знаходзяцца ў спакоі адносна пэўнай інерцыяльнай сістэмы адліку, электрамагнітнае ўзаемадзеянне паміж імі называюць электрастатычным. Пры руху электрычна зараджаных цел (часціц) праяўляецца яшчэ адна складаючая электрамагнітнага ўзаемадзеяння — *магнітнае ўзаемадзеянне.*

У гэтай главе вы пазнаёміцеся са з'явамі, у якіх важную ролю адыгрывае магнітнае ўзаемадзеянне, абумоўленае існаваннем магнітнага поля, што ствараецца пастаяннымі магнітамі, электрычным токам або электрычным полем, якое змяняецца з цягам часу.

§ 29. Дзеянне магнітнага поля на праваднік з токам. Узаемадзеянне праваднікоў з токам

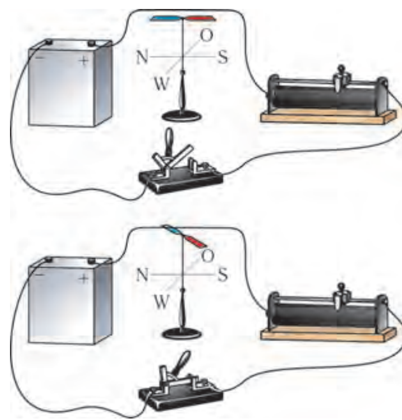
Тое, што магніты ўзаемадзейнічаюць адзін з адным, прычым рознаіменныя полюсы магнітаў прыцягваюцца, а аднайменныя — адштурхваюцца (рыс. 180), што распілены напалам магніт ператвараецца ў два магніты, а жалеза пры судакрананні з магнітам намагнічваецца, упершыню апісаў французскі вучоны П'ер дэ Мерыкур ў трактаце «Пісьмо аб магніце» (1269 г.). У 1759 г. на ўзаемасувязь электрычнасці і магнетызму звярнуў увагу Ф. Эпінус у трактаце «Вопыт тэорыі электрычнасці і магнетызму». У 8 класе вы даведаліся, што англійскі прыродазнаўца і прыдворны лекар Уільям Гільберт (1544—1603) у трактаце «Аб магніце, магнітных целах і аб вялікім магніце — Зямлі. Новая фізіялогія, д999азаная мноствам аргументаў і доследаў» (1600 г.), які змяшчае апісанне



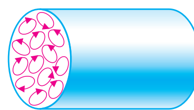
Рыс. 180

больш за 600 доследаў, праведзеных вучоным, падвёў вынік работам усіх сваіх папярэднікаў і ўласным васямнаццацігадовым пошукам. Вы таксама абмяркоўвалі, як дацкі фізік Г. Х. Эрстэд (1777—1851) выявіў, што магнітная стрэлка, размешчаная каля праводніка, паварочвалася на некаторы вугал пры праходжанні па праводніку электрычнага току (рыс. 181), імкнучыся зарыентавацца перпендыкулярна праводніку.

Адкрыццё Эрстэда дазволіла Амперу зрабіць вывад, што магнітныя ўласцівасці любога цела вызначаюцца замкнутымі электрычнымі токамі, якія цыркулююць унутры гэтага цела і носяць назву «амперавы токі» ці «малекулярныя токі» (рыс. 182). Гэта значыла, што магнітнае ўзаемадзеянне абумоўлена не асаблівымі магнітнымі зарадамі, а рухам электрычных зарадаў — электрычным токам.



Рыс. 181



Рыс. 182

Магнітнае поле. Узаемадзеянне праводніка з токам і магнітнай стрэлкі ў доследзе Эрстэда з'яўляецца ўзаемадзеяннем электрычнага току праводніка з «амперавымі токамі» ў магнітнай стрэлцы (гіпотэза Ампера). Гэта ўзаемадзеянне ажыццяўляецца пры дапамозе *магнітнага поля.*

Доследы паказваюць, што магнітнае поле ўзнікае пры руху любых электрычных зарадаў — свабодных электронаў металічнага праводніка, іонаў электраліту і газу, электронаў і дзірак паўправадніка, звязаных зарадаў пры руху зараджанага дыэлектрыка. Паколькі скорасць руху зараду залежыць ад выбару сістэмы адліку, магнітнае поле аднаго і таго ж зараду ў розных сістэмах адліку будзе розным. Калі ў адносінах да пэўнай інерцыяльнай сістэмы адліку электрычны зарад знаходзіцца ў спакоі, то ў гэтай сістэме адліку ён стварае толькі электрастатычнае поле. Электрычны зарад, які рухаецца адносна дадзенай інерцыяльнай сістэмы адліку, стварае ў ёй не толькі электрычнае поле, але і магнітнае, якія з'яўляюцца кампанентамі адзінага электрамагнітнага поля.

Згодна з уяўленнямі класічнай электрадынамікі *магнітнае поле* — асаблівая форма матэрыі, створаная электрычнымі зарадамі, якія рухаюцца (аднос-

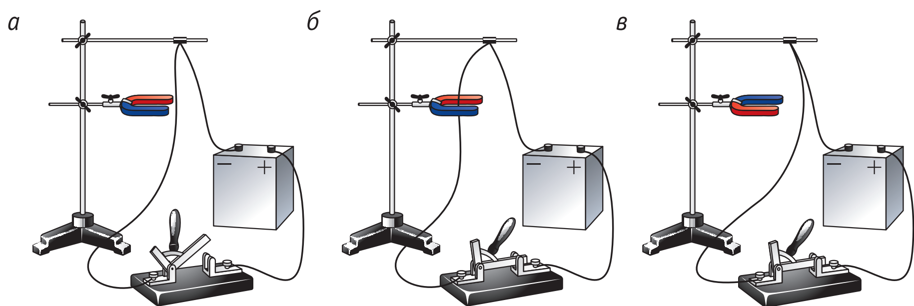
на пэўнай інерцыяльнай сістэмы адліку), або пераменнымі электрычнымі палямі. З дапамогай магнітнага поля ажыццяўляецца ўзаемадзеянне паміж рухомымі электрычнымі зарадамі (а таксама магнітамі). Інакш кажучы, кожны электрычны зарад, які рухаецца ў дадзенай інерцыяльнай сістэме адліку, стварае ў навакольнай прасторы магнітнае поле, якое дзейнічае з некаторымі сіламі на любыя іншыя электрычныя зарады (пастаянныя магніты), што рухаюцца ў дадзеным магнітным полі. Такім чынам, аб існаванні магнітнага поля можна меркаваць па наяўнасці сілы, што дзейнічае на электрычны зарад, які рухаецца адносна выбранай інерцыяльнай сістэмы адліку.

Сучасныя навуковыя ўяўленні не адвяргаюць, а, наадварот, прадказваюць часціцы з магнітным зарадам — магнітныя монапалі. Аднак такія часціцы пакуль эксперыментальна не назіралі.

Сілы, якія дзейнічаюць з боку магнітнага поля на праваднікі з токам, што ў ім знаходзяцца, ці зарады, што рухаюцца, у далейшым будзем называць *магнітнымі сіламі*.

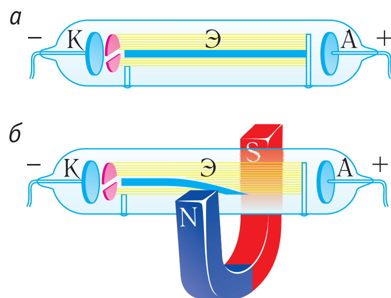
Дзеянне магнітнага поля на праваднік з токам. Паколькі магнітнае поле правадніка з токам дзейнічае з пэўнай сілай на магніт (у доследзе Эрстэда — на магнітную стрэлку), то натуральна дапусціць, што з боку магнітнага поля магніта на праваднік з токам павінна дзейнічаць сіла. Гэтае дапушчэнне можна праверыць шляхам доследаў.

Збяром электрычны ланцуг, паказаны на рысунку 183, *а*. Пры разамкнутым ланцугу дзеяння з боку магнітнага поля дугападобнага магніта на гнуткі праваднік не назіраецца. Пры замыканні ланцуга праваднік прыходзіць у рух: ён або ўцягваецца ў прастору паміж полюсамі дугападобнага магніта (рыс. 183, *б*), або выштурхваецца з яе (рыс. 183, *в*) пры адваротным размяшчэнні полюсаў магніта (ці пры змяненні напрамку току). Гэты доследы яшчэ раз даказвае, што магнітнае поле дзейнічае толькі на зарады, якія рухаюцца.



Рыс. 183

Ці дзейнічае магнітнае поле на зараджаныя часціцы, якія рухаюцца ў вакууме? Няхай у катоднай трубцы (рыс. 184, *а*) ад катода *К* да анода *А* рухаецца пучок электронаў. Пры адсутнасці знешняга магнітнага поля ён будзе рухацца прамалінейна і перпендыкулярна да паверхні анода. Калі да трубкі паднесці магніт (рыс. 184, *б*), то электронны пучок адхіліцца ўніз. Памяняўшы месцамі размяшчэнне полюсаў магніта, можна адхіліць пучок уверх. Траекторыю электронаў унутры трубкі можна назіраць дзякуючы экрану *Э*, пакрытаму люмінафорам — рэчывам, якое свеціцца пад уздзеяннем удараў электронаў аб яго.

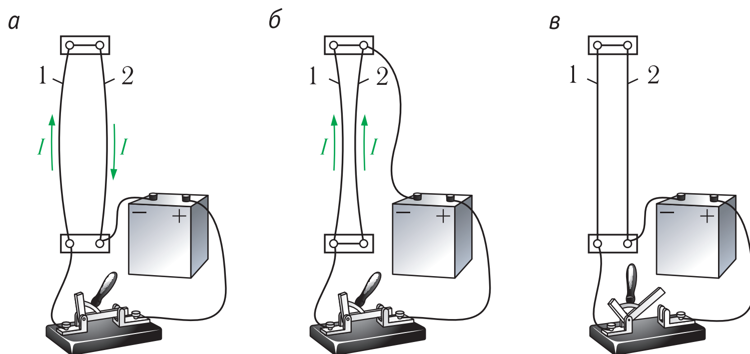


Рыс. 184

Ва ўсіх разгледжаных выпадках на праваднікі з токам (зараджаныя часціцы, што рухаюцца) дзейнічала магнітная сіла, якую можна разглядаць як вынік ўзаемадзеяння магнітнага поля пастаяннага магніта з магнітным полем правадніка з токам (зараджаных часціц, што рухаюцца).

Узаемадзеянне праваднікоў з токам. Адкрыццё Эрстэда дало штуршок да даследаванняў па выяўленні сувязі паміж электрычнымі і магнітнымі з'явамі. Ампер у 1820 г. правёў шэраг эксперыментаў па вывучэнні ўзаемадзеяння двух гнуткіх першапачаткова паралельных і прамалінейных праваднікоў з токам. Ампер выявіў, што ў выпадку, калі токі ў праводніках праходзяць у супрацьлеглых напрамках, праваднікі адштурхваюцца (рыс. 185, *а*), а калі ў адным напрамку — прыцягваюцца (рыс. 185, *б*). Пры адсутнасці токаў у праводніках яны не ўзаемадзейнічаюць (рыс. 185, *в*).

Паколькі ў прасторы вакол праваднікоў з токам існуе магнітнае поле, то ўзаемадзеянне такіх праваднікоў абумоўлена магнітнымі сіламі.



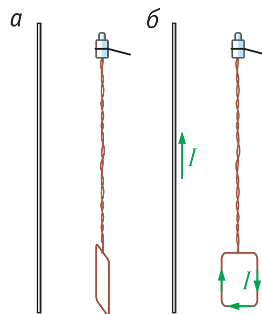
Рыс. 185

! Калі разглядаць узаемадзеянне праваднікоў з токам больш дэталёва, то трэба адзначыць, што яно мае як магнітную, так і электрычную кампаненты. Электрычнае ўзаемадзеянне абумоўлена зарадамі, якія знаходзяцца на паверхні праваднікоў з токам. Сцверджанне аб тым, што праваднікі з токамі аднаго напрамку прыцягваюцца, з'яўляецца правільным толькі ў тым выпадку, калі электрычнае ўзаемадзеянне паміж праваднікамі значна слабейшае, чым магнітнае, г. зн. калі супраціўленне праваднікоў малое, а сіла току ў іх дастаткова вялікая.

Магнітнае ўзаемадзеянне двух паралельных праваднікоў з токам выкарыстоўваюць у СІ для вызначэння адзінкі сілы току — ампера (А).

1 А — сіла нязменнага току, які пры праходжанні па двух паралельных прамалінейных праводніках бясконцай даўжыні і мізэрна малога кругавога сячэння, размешчаных на адлегласці 1 м адзін ад аднаго ў вакууме, выклікаў бы паміж гэтымі праваднікамі сілу магнітнага ўзаемадзеяння, модуль якой роўны $2 \cdot 10^{-7}$ *Н на кожны метр даўжыні.*

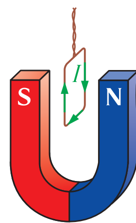
Дзеянне магнітнага поля на рамку з токам. Дзеянне магнітнага поля на праваднік з токам не заўсёды праяўляецца ў прыцяжэнні ці адштурхванні. У гэтым можна пераканацца з дапамогай доследу. На некаторай адлегласці ад правадніка падвесім на тонкіх і гнуткіх падводзячых правадах маленькую (у параўнанні з адлегласцямі, на якіх магнітнае поле прыкметна змяняецца) рамку (рыс. 186, *а*). Пры прапусканні па праваднікy і рамцы электрычнага току рамка павернецца і размесціцца так, што апынецца ў адной плоскасці з праваднікам з токам (рыс. 186, *б*).



Рыс. 186

! Дзеянне магнітнага поля на ток у падводзячых правадах можна не прымаць пад увагу, калі яны абвіваюць адзін аднаго (гл. рыс. 186) або размешчаны блізка адзін да аднаго. Сапраўды, правады знаходзяцца ў адной і той жа вобласці поля і па іх праходзяць токі аднолькавай сілы і супрацьлеглага напрамку. Такім чынам, сілы, якія дзейнічаюць на ток у падводзячых правадах з боку магнітнага поля, роўныя па модулі і супрацьлегла накіраваныя. Значыць, падвес застаецца ў спакоі. Рамка, размешчаная непасрэдна каля правадніка, будзе не толькі паварочвацца, але яшчэ і прыцягвацца да правадніка з токам, бо паблізу правадніка істотна праяўляецца неаднароднасць магнітнага поля, створанага токам у праваднікy.

Арыентуючае дзеянне на рамку з токам аказвае не толькі магнітнае поле правадніка з токам. Змесцім драцяную рамку, якая можа свабодна паварочвацца, паміж полюсамі пастаяннага дугападобнага магніта. Калі па рамцы праходзіць ток, яна ўстанаўліваецца так, што яе плоскасць знаходзіцца перпендыкулярна прамой, якая злучае полюсы магніта (рыс. 187). Такім чынам, магнітнае поле аказвае на рамку з токам *арыентуючае дзеянне*, такое ж, як і на стрэлку компаса.



Рыс. 187

1. Магнітнае поле — асаблівая форма матэрыі, створаная электрычнымі зарадамі, якія рухаюцца (адносна пэўнай інерцыяльнай сістэмы адліку), або пераменнымі электрычнымі палямі.

2. Кожны электрычны зарад, што рухаецца, стварае ў навакольнай прасторы магнітнае поле, якое дзейнічае з пэўнымі сіламі на любыя іншыя электрычныя зарады, што рухаюцца.

3. Магнітная сіла — сіла, якая дзейнічае з боку магнітнага поля на праваднік з токам, зарад, што рухаецца, або магніт, якія знаходзяцца ў гэтым полі.

4. 1 А — сіла нязменнага току, які пры праходжанні па двух паралельных прамалінейных праваднiках бясконцай даўжыні і мізэрна малога кругавога сячэння, размешчаных на адлегласці 1 м адзін ад аднаго ў вакууме, выклікаў бы паміж гэтымі праваднікамі сілу магнітнага ўзаемадзеяння, модуль якой роўны $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожны метр даўжыні.

5. Магнітнае поле аказвае арыентуючае дзеянне на рамку з токам і на магнітную стрэлку.

1. Якія палі існуюць у прасторы, што акружае электрычны зарад, які рухаецца?

2. Што ўяўляе сабой магнітнае поле? Як яго можна выявіць?

3. Што называюць магнітнай сілай?

4. Які дослед даказвае, што магнітнае поле дзейнічае толькі на зарады, якія рухаюцца?

5. Якую з'яву выкарыстоўваюць для вызначэння адзінкі сілы току ў СІ?

6. У чым праяўляецца дзеянне магнітнага поля на рамку з токам?

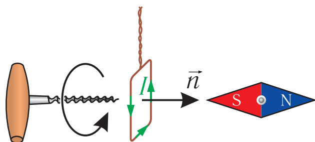
7. У кнізе французскага прыродазнаўцы Араго «Гром і маланка» прыведзены прыклады перамагнічвання стрэлкі компаса і намагнічвання стальных прадметаў дзеяннем маланкі. Як можна растлумачыць гэтыя з'явы?

§ 30. Індукцыя магнітнага поля. Лініі магнітнай індукцыі

Вывучаючы электрастатыку, вы даведаліся, што размеркаванне поля ў прасторы можна зрабіць «бачным», карыстаючыся ўяўленнямі аб лініях напружанасці. Пры вывучэнні фізікі ў 8 класе вы даведаліся, што магнітныя палі таксама можна паказваць графічна ў выглядзе магнітных ліній. Для апісання магнітнага поля ўвядзём яго асноўную характарыстыку, аналагічную напружанасці $\vec{E}$ *электрастатычнага поля. Такой характарыстыкай служыць індукцыя магнітнага поля* $\vec{B}$ *(або магнітная індукцыя), якая з'яўляецца вектарнай велічынёй і дазваляе вызначыць сілу, што дзейнічае на праваднік з токам (зарад, які рухаецца) у магнітным полі.*

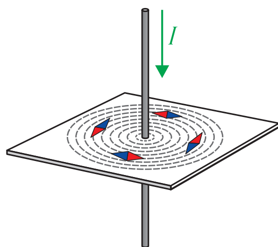
Напрамак індукцыі магнітнага поля. Для вызначэння напрамку індукцыі магнітнага поля $\vec{B}$ выкарыстоўваюць арыентуючае дзеянне магнітнага поля на магнітную стрэлку ці рамку з токам. Напрамак ад паўднёвага полюса S да паўночнага полюса N магнітнай стрэлкі, якая свабодна ўстанаўліваецца ў магнітным полі, прымаюць за напрамак магнітнай індукцыі.

Напрамак магнітнай індукцыі $\vec{B}$ у тым месцы магнітнага поля, дзе размешчана невялікая плоская рамка з токам, супадае з напрамкам дадатнай нармалі $\vec{n}$ да плоскасці рамкі. Напрамкам дадатнай нармалі прынята лічыць напрамак руху свярдзёлка, ручку якога паварочваюць у напрамку току ў рамцы. У магнітным полі, што даследуецца, напрамак дадатнай нармалі супадае з напрамкам ад паўднёвага полюса S да паўночнага полюса N магнітнай стрэлкі (рыс. 188).



Рыс. 188

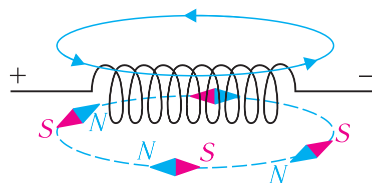
У магнітным полі прамалінейнага правадніка з токам магнітныя стрэлкі размяшчаюцца па датычных да акружнасцей (рыс. 189), цэнтры якіх ляжаць на восі правадніка.



Рыс. 189

На практыцы часта даводзіцца мець справу з магнітнымі палямі электрычных токаў, якія праходзяць па шпулях (саленоідах). У магнітным полі шпулі з токам магнітныя стрэлкі ўстанаўліваюцца

па датычных да замкнутых крывых, што ахопліваюць віткі шпулі (рыс. 190).



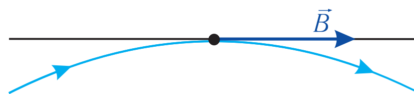
Рыс. 190

Лініі магнітнай індукцыі. Такім чынам, даследуючы магнітнае поле, створанае правадніком з токам або пастаянным магнітам, з дапамогай магнітнай стрэлкі ў кожным пункце прасторы можна вызначыць напрамак магнітнай індукцыі. Такое даследаванне дазваляе графічна адлюстраваць прасторавую структуру магнітнага поля ў выглядзе ліній магнітнай індукцыі.

Лініяй індукцыі магнітнага поля называюць уяўную лінію ў прасторы, датычная да якой супадае з напрамкам індукцыі магнітнага поля ў кожным пункце поля (рыс. 191). Лініі магнітнай індукцыі бесперапынныя (не маюць ні пачатку, ні канца), замыкаюцца самі на сябе. Гэта характэрна для любых магнітных палей. Палі, якія валодаюць такой уласцівасцю, называюць *віхравымі*.

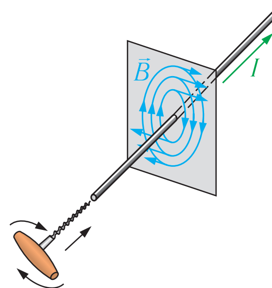
Відавочна, што праз любы пункт у магнітным полі можна правесці толькі адну лінію індукцыі. Паколькі індукцыя магнітнага поля ў любым пункце прасторы мае пэўны напрамак, то і напрамак лініі індукцыі ў кожным пункце гэтага поля можа быць толькі адзін. Гэта значыць, што лініі магнітнай індукцыі, як і лініі напружанасці электрычнага поля, не перасякаюцца.

Вызначыць напрамак ліній магнітнай індукцыі можна, выкарыстаўшы *правіла свярдзёлка: калі паступальны рух свярдзёлка супадае з напрамкам току, то ручка свярдзёлка паварочваецца ў напрамку ліній магнітнай індукцыі*. У выпадку прамалінейнага правадніка лініі магнітнай індукцыі ўяўляюць сабой канцэнтрычныя акружнасці, якія знаходзяцца ў пласкасцях, перпендыкулярных да правадніка з токам (рыс. 192).



Рыс. 191

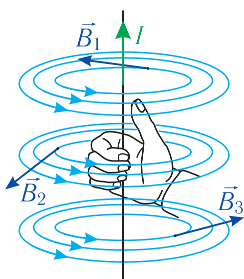
Вызначыць напрамак ліній індукцыі магнітнага поля прамалінейнага правадніка з токам можна таксама з дапамогай правіла правай рукі: *калі мысленна абхапіць праваднік правай рукой так, каб вялікі палец паказваў напрамак току,*



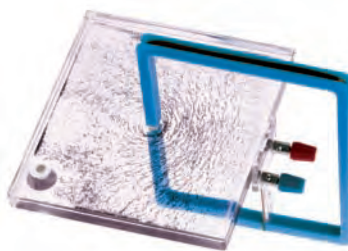
Рыс. 192

то астатнія пальцы будуць сагнутымі ў напрамку ліній магнітнай індукцыі (рыс. 193).

Карціну ліній магнітнай індукцыі можна атрымаць, выкарыстаўшы дробныя жалезныя апілкі, якія ў магнітным полі паводзяць сябе, як магнітныя стрэлкі. На рысунку 194 паказана карціна магнітнага поля прамалінейнага ўчастка праваднiка з токам. Карціна магнітнага поля кругавога вітка з токам і графічная выява ліній магнітнай індукцыі адлюстраваны на рысунку 195, *а*, *б*.

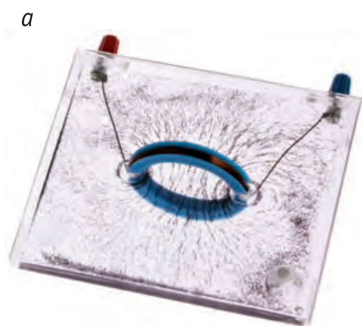


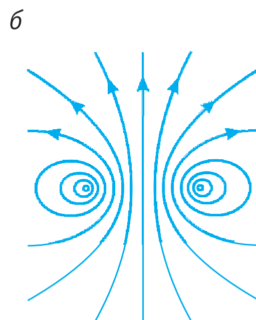
Рыс. 193



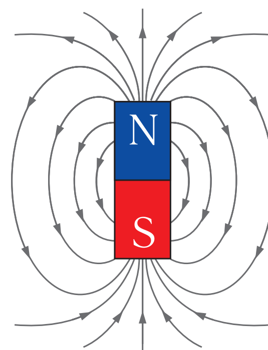
Рыс. 194

Мяркуюць, што лініі індукцыі магнітнага поля, створанага пастаянным магнітам, накіраваны ўнутры магніта ад яго паўднёвага полюса S да паўночнага полюса N (рыс. 196).



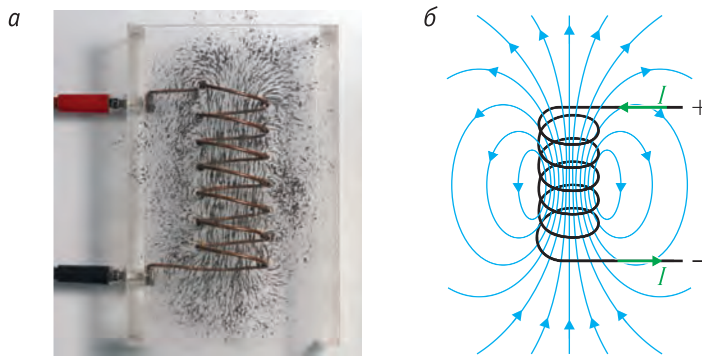


Рыс. 195



Рыс. 196

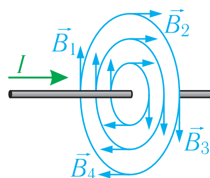
Магнітнае поле саленоіда з токам падобнае на поле паласавога магніта. На рысунку 197, *а, б* паказана карціна магнітнага поля саленоіда з токам і дадзена графічная выява ліній індукцыі. Саленоід уяўляе сабой цыліндрычную шпулю, на якой віток да вітка нрматаны провад. Калі даўжыня саленоіда значна большая за яго дыяметр, то ўнутры цэнтральнай часткі саленоіда лініі індукцыі магнітнага поля практычна паралельныя і накіраваны ўздоўж яго восі. Разлікамі можна паказаць, што лікавае значэнне магнітнай індукцыі ўнутры доўгага саленоіда далёка ад яго тарцоў будзе аднолькавым ва ўсіх пунктах. Для нагляднасці на рысунках лініі індукцыі паказваюць гусцей у тых месцах магнітнага поля, дзе значэнне магнітнай індукцыі большае (гл. рыс. 197, *б*). Пры гэтым на лініі індукцыі ставяць стрэлку ў напрамку індукцыі магнітнага поля. Для крайніх віткоў саленоіда магнітнае поле кругавога вітка з токам, які праходзіць у напрамку руху гадзіннікавай стрэлкі, эквівалентнае полю паўднёвага полюса пастаяннага магніта, а магнітнае поле кругавога вітка з токам, які праходзіць супраць напрамку руху гадзіннікавай стрэлкі, эквівалентнае полю паўночнага полюса пастаяннага магніта (*правіла гадзіннікавай стрэлкі*).



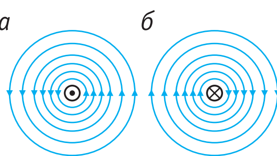
Рыс. 197

Магнітнае поле, індукцыя якога ва ўсіх пунктах аднолькавая, называюць *аднародным*. Лініі індукцыі такога поля паралельныя. У адваротным выпадку поле называюць неаднародным. Магнітнае поле ўнутры доўгага саленоіда практычна аднароднае. Паблізу краёў саленоіда магнітнае поле ўжо не аднароднае. Не аднароднае і магнітнае поле прамалінейнага правадніка з токам (гл. рыс. 192).

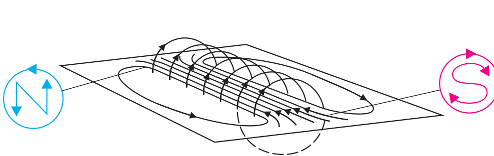
Вызначэнне напрамку магнітнай індукцыі. Для вызначэння напрамку магнітнай індукцыі можна выкарыстаць любое з правілаў, сфармуляваных вышэй. Прычым, карыстаючыся правілам свярдзёлка, трэба памятаць, што напрамак току — гэта напрамак упарадкаванага руху дадатных зарадаў. Калі на рысунку прамалінейны праваднік з токам паказаны не ў плоскасці старонкі, бо размешчаны перпендыкулярна ёй (рыс. 198), і пры гэтым ток накіраваны да чытача, то яго ўмоўна абазначаюць кропкай (рыс. 199, *а*), у выпадку, калі ток накіраваны ад чытача, — крыжыкам (рыс. 199, *б*). Гэтак жа (кропка і крыжык) абазначаюць вектары (магнітная індукцыя, сіла і інш.), калі іх напрамкі перпендыкулярныя плоскасці рысунка.



Рыс. 198



Рыс. 199


Рыс. 200

Полюсы саленоіда, а значыць, і напрамак магнітнай індукцыі, можна вызначыць па правіле гадзіннікавай стрэлкі (рыс. 200) або па правіле свярдзёлка: пры паварочванні ручкі свярдзёлка па току ў вітку паступальны рух вастрыя свярдзёлка пакажа напрамак магнітнай індукцыі ўнутры саленоіда, а значыць, і становішча яго паўночнага полюса.

1. За напрамак індукцыі магнітнага поля прымаюць напрамак ад паўднёвага полюса S да паўночнага полюса N магнітнай стрэлкі, якая свабодна ўстанаўліваецца ў магнітным полі. Гэты напрамак супадае з напрамкам дадатнай нармалі да плоскасці невялікай рамкі з токам, свабодна зарыентаванай у наваколлі гэтага ж пункта магнітнага поля.

2. Лініяй індукцыі магнітнага поля называюць уяўную лінію ў магнітным полі, датычная да якой супадае з напрамкам індукцыі магнітнага поля ў кожным пункце.

3. Лініі індукцыі магнітнага поля заўсёды замкнутыя і не перасякаюцца.

4. Магнітнае поле, індукцыя якога ва ўсіх пунктах аднолькавая, называюць аднародным.

?

1. Як графічна паказваюць магнітнае поле? Што называюць лініямі магнітнай індукцыі?

2. Якія правілы выкарыстоўваюць для вызначэння напрамку магнітнай індукцыі?

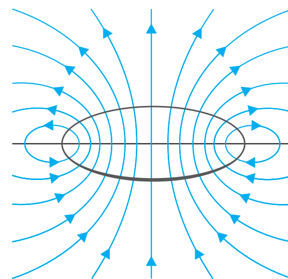
3. Якая карціна ліній магнітнай індукцыі поля прамалінейнага праваднікa з токам? кругавога вітка з токам? шпулі з токам? Як вызначаюць напрамак ліній магнітнай індукцыі?

4. Якія палі называюць віхравымі?

5. У чым адрозненне магнітнага поля ад электрастатычнага?

6. Якое магнітнае поле называюць аднародным?

7. На рысунку 201 схематычна паказана магнітнае поле кругавога вітка з токам. Ці аднароднае магнітнае поле вітка? Чаму?

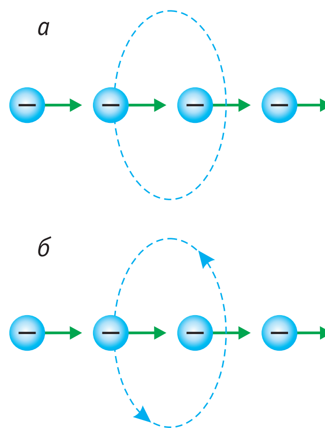


Рыс. 201

Прыклады рашэння задач

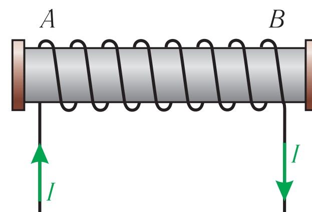
Прыклад 1. Пучок электронаў рухаецца так, як паказана на рысунку 202, *а*. Вызначце напрамак ліній індукцыі магнітнага поля, створанага гэтым пучком.

Рашэнне. Вызначыць напрамак ліній індукцыі магнітнага поля, створанага пучком электронаў, якія рухаецца, можна як па правіле свярдзёлка, так і па правіле правай рукі. Аднак трэба памятаць, што гэтыя правілы сфармуляваны для дадатных зарадаў, якія рухаюцца. Таму ў дадзеным выпадку трэба ўлічыць, што за напрамак электрычнага току прыняты напрамак, супрацьлеглы руху электронаў, якія ўтвараюць пучок. Тады, калі глядзець на лінію індукцыі па напрамку руху электронаў, яна будзе зарыентавана супраць напрамку руху гадзіннікавай стрэлкі (рыс. 202, *б*).



Рыс. 202

Прыклад 2. На рысунку 203 паказаны напрамак электрычнага току ў саленоідзе. Вызначце магнітныя полюсы саленоіда.



Рыс. 203

Р а ш э н н е. У дадзенай задачы для вызначэння магнітных полюсаў саленоіда можна выкарыстаць як правіла свярдзёлка, так і правіла гадзіннікавай стрэлкі. У першым выпадку будзем мысленна паварочваць ручку свярдзёлка па напрамку току ў вітках саленоіда. Вастрыё свярдзёлка пры гэтым перамяшчаецца ўздоўж восі саленоіда ад тарца *A* да тарца *B*. Паколькі лініі індукцыі ўнутры магніта накіраваны ад паўднёвага полюса да яго паўночнага полюса, то па аналогіі можна зрабіць вывад, што каля тарца *A* — паўднёвы полюс саленоіда, каля тарца *B* — паўночны.

Праверым свой вывад, прымяніўшы правіла гадзіннікавай стрэлкі. Калі глядзець з боку тарца *A* саленоіда, то бачна, што напрамак току ў вітку супадае з напрамкам руху гадзіннікавай стрэлкі. Значыць, каля тарца *A* — паўднёвы полюс, а каля тарца *B* — паўночны.

Практыкаванне 21

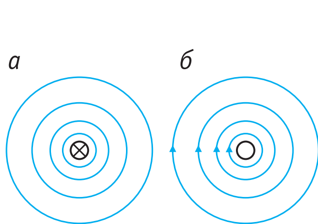
1. Магнітная стрэлка, размешчаная пад медным правадніком, паварочваецца пры праходжанні па ім электрычнага току. Ці будзе стрэлка паварочвацца, калі медны праваднік замяніць водным растворам шчолачы, змешчаным у тонкую шкляную трубку?

2*. За кошт якой энергіі выконваецца механічная работа па павароце рамкі з токам, што знаходзіцца ў магнітным полі?

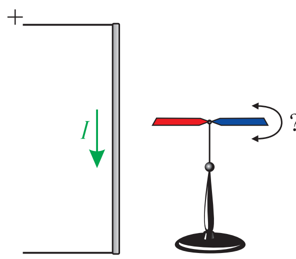
3. Як накіраваны лініі магнітнай індукцыі поля, створанага прамалінейным правадніком з токам, паказаныя на рысунку 204, *а*? У якім напрамку праходзіць электрычны ток у праводніку, паказаным на рысунку 204, *б*?

4. Як будзе паводзіць сябе магнітная стрэлка, калі побач з ёй размясціць прамалінейны праваднік з электрычным токам (рыс. 205)?

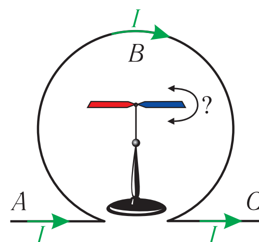
5. Па кругавым вітку праходзіць электрычны ток (рыс. 206). Як установіцца магнітная стрэлка, калі яе змясціць у цэнтр вітка? Дзеянне магнітнага поля Зямлі не ўлічвайце.



Рыс. 204



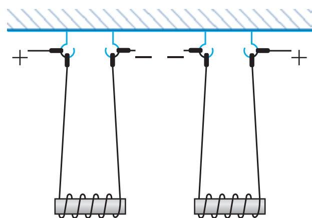
Рыс. 205



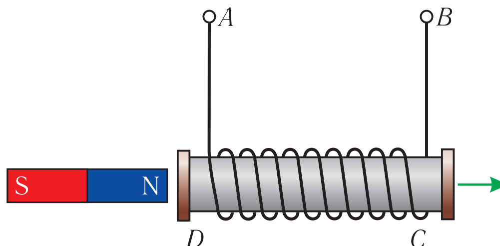
Рыс. 206

6. Як будуць узаемадзейнічаць дзве шпулі, падвешаныя на тонкіх правадах, калі іх падключыць да крыніц току (рыс. 207)?

7. Пры падключэнні саленоіда да полюсаў крыніц току ён адштурхваецца ад размешчанага паблізу пастаяннага магніта (рыс. 208). У якім напрамку ідзе ток у саленоідзе?



Рыс. 207



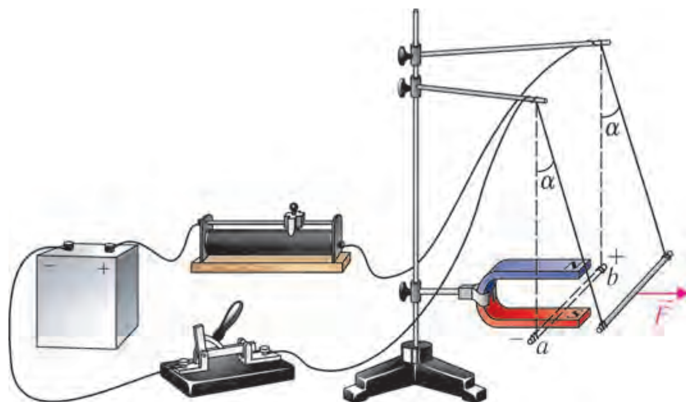
Рыс. 208

§ 31. Закон Ампера. Прынцып суперпазіцыі магнітных палёў

Для колькаснага апісання магнітнага поля неабходна ведаць не толькі напрамак індукцыі магнітнага поля, але і яе модуль. Колькасна апісаць магнітнае поле можна, як і электрастатычнае, на аснове яго крыніц, г. зн. токаў. Для выяўлення магнітнага поля і вызначэння яго характарыстык выкарыстоўваюць «пробны» ток, які ўяўляе сабой малы ўчастак праваднікa (элемент току). Вызначыўшы сілу, якая дзейнічае на кожны элемент току з боку магнітнага поля, можна вылічыць сілу, якая дзейнічае на ўвесь праваднік.

Модуль індукцыі магнітнага поля. Дзеянне магнітнага поля на малы ўчастак праваднікa з токам, які знаходзіцца ў гэтым полі, эксперыментальна даследаваў Ампер, праводзячы доследы з рознымі праваднікамі, што ўваходзілі ў замкнутыя электрычныя ланцугі. У 1820 г. Ампер атрымаў формулу для сілы, з якой аднароднае магнітнае поле дзейнічае на прамалінейны ўчастак праваднікa з токам.

Пастаянны дугападобны магніт замацуем у вертыкальнай плоскасці так, каб лініі індукцыі магнітнага поля, якое ён стварае ў прасторы паміж полюсамі, размяшчаліся вертыкальна (рыс. 209). Магнітнае поле магніта, у асноўным



Рыс. 209

сканцэнтраванае паміж яго полюсамі, будзем лічыць аднародным. Менавіта ў гэтай вобласці поля знаходзіцца малы (вызначаемы памерамі вобласці прасторы, дзе магнітнае поле практычна аднароднае) участак Δl прамалінейнага правадніка даўжынёй $l > \Delta l$. Гэты праваднік падвешаны і злучаны з крыніцай току з дапамогай тонкіх правадоў так, каб ён размяшчаўся перпендыкулярна плоскасці, у якой знаходзіцца магніт. Дзеянне слабага магнітнага поля на астатнія часткі электрычнага ланцуга можна не прымаць пад увагу.

Пры замыканні ланцуга ў залежнасці ад напрамку электрычнага току і размяшчэння полюсаў магніта праваднік пад дзеяннем гарызантальнай сілы $\vec{F}$ пачне рухацца ўправа або ўлева. Пры гэтым падвес адхіляецца ад вертыкальнага становішча на некаторы вугал α. Павялічваючы сілу току ў электрычным ланцугу ў 2, 3, 4 ... разы, можна заўважыць, што ў столькі ж разоў павялічваецца і модуль сілы F, якая дзейнічае на праваднік (яго можна вымераць дынамометрам, адхіляючы абясточаны падвес на такі ж вугал α, або разлічыць па формуле $F = mg\,\mathrm{tg}\,\alpha$). Дабавіўшы яшчэ адзін такі ж і гэтак жа размешчаны магніт для павелічэння памераў вобласці, дзе магнітнае поле дастаткова вялікае і практычна аднароднае, можна дасягнуць павелічэння даўжыні $\Delta l'$ прамалінейнага ўчастка правадніка, які знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, $\Delta l' = 2\Delta l < l$. Модуль сілы, што дзейнічае на праваднік, пры гэтым павялічваецца ў 2 разы. Размяшчаючы магніт не ў вертыкальнай плоскасці, а пад вуглом да паверхні стала, на якім знаходзіцца ўстаноўка, можна змяняць вугал паміж напрамкам ліній індукцыі і правадніком. Як паказвае дослед, модуль сілы, з якой магнітнае поле дзейнічае на праваднік з токам, прама прапарцы-

янальны сінусу вугла паміж напрамкамі току ў правадніку і магнітнай індукцыі. Прычым модуль сілы дасягае максімальнага значэння $F_{max} \sim I\Delta l$, калі ўчастак правадніка з токам утварае вугал 90° з напрамкам індукцыі магнітнага поля ($\sin 90^{\circ} = 1$), і мінімальны ($F_{min} = 0$) у выпадку размяшчэння правадніка паралельна лініям індукцыі ($\sin 0^{\circ} = 0$).

Такім чынам, модуль сілы, што дзейнічае з боку аднароднага магнітнага поля на прамалінейны ўчастак правадніка з токам, прапарцыянальны сіле току I, даўжыні гэтага ўчастка Δl і сінусу вугла α паміж напрамкамі току ў правадніку і індукцыі магнітнага поля:

$$F \sim I\Delta l \sin\alpha.$$

Гэта сіла названа ў гонар А. М. Ампера *сілай Ампера*.

Паколькі $F_{max} \sim I\Delta l$, то адносіна $\dfrac{F_{max}}{I\Delta l}$ для дадзенай вобласці магнітнага поля не залежыць ні ад сілы току I у правадніку, ні ад даўжыні Δl прамалінейнага ўчастка правадніка, што цалкам знаходзіцца ў аднародным магнітным полі. Таму дадзеная адносіна можа служыць характарыстыкай той вобласці магнітнага поля, у якой знаходзіцца ўчастак правадніка. Гэта дазваляе даць наступнае азначэнне індукцыі магнітнага поля.

Індукцыя магнітнага поля — фізічная вектарная велічыня, модуль якой роўны адносіне модуля максімальнай сілы F_{max}, якая дзейнічае з боку магнітнага поля на прамалінейны ўчастак правадніка з токам, да здабытку сілы току I і даўжыні Δl гэтага ўчастка:

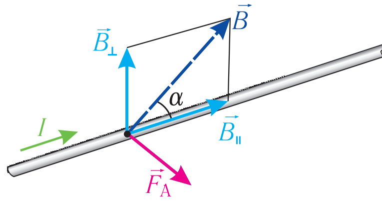
$$\boldsymbol{B} = \frac{\boldsymbol{F}_{max}}{\boldsymbol{I}\Delta \boldsymbol{l}}. \qquad (31.1)$$

Такім чынам, у кожным пункце магнітнага поля можа быць вызначаны як напрамак індукцыі магнітнага поля, так і яе модуль.

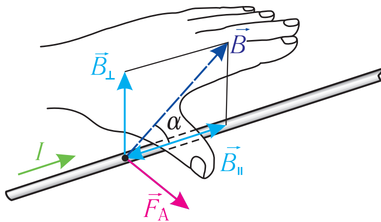
У СІ індукцыю магнітнага поля вымяраюць у тэслах (Тл) у гонар сербскага інжынера і вынаходніка Нікола Тэсла (1856—1943), які з 1884 г. працаваў у ЗША. 1 Тл — індукцыя такога аднароднага магнітнага поля, якое на прамалінейны ўчастак правадніка даўжынёй 1 м пры сіле току ў ім 1 А дзейнічае максімальнай сілай, модуль якой 1 Н:

$$1\ \text{Тл} = \frac{1\ \text{Н}}{1\ \text{А} \cdot 1\ \text{м}} = 1\ \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1\ \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}.$$

Сіла Ампера. Няхай магнітная індукцыя ўтварае вугал α з напрамкам току ў прамалінейным участку правадніка даўжынёй Δl (рыс. 210). Калі ўвесь прамалінейны праваднік даўжынёй l знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, то $\Delta l = l$. Як ужо адзначалася, у выпадку размяшчэння правадніка паралельна



Рыс. 210



Рыс. 211

лініям індукцыі магнітнае поле не аказвае на праваднік ніякага ўздзеяння. Таму модуль сілы Ампера залежыць толькі ад модуля складаючай магнітнай індукцыі $B_\perp = B\sin\alpha$, перпендыкулярнай правадніку, і не залежыць ад модуля складаючай $B_{||} = B\cos\alpha$, паралельнай праваднiку.

З выразу (31.1) вынікае, што модуль максімальнай сілы Ампера

$$F_{max} = BI\Delta l.$$

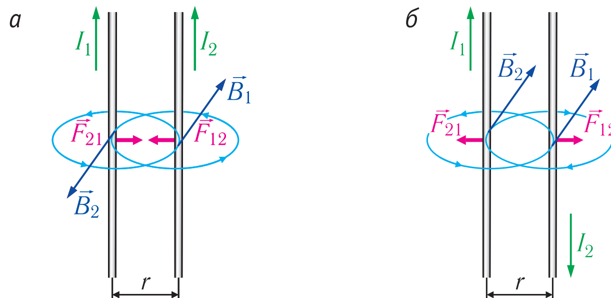
У агульным выпадку модуль сілы Ампера можна разлічыць па формуле

$$\boldsymbol{F_A = BI\Delta l \sin\alpha.} \quad (31.2)$$

Выраз (31.2) называюць *законам Ампера*.

Напрамак сілы Ампера вызначаюць паводле *правіла левай рукі: калі левую руку размясціць так, каб перпендыкулярная да правадніка складаючая індукцыі магнітнага поля $\vec{B}_\perp$ уваходзіла ў далонь, чатыры выцягнутыя пальцы былі накіраваны па току, то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак сілы Ампера, якая дзейнічае на прамалінейны ўчастак правадніка з токам* (рыс. 211).

Закон Ампера дазваляе растлумачыць узаемадзеянне паралельных праваднікоў з токам (рыс. 212). Ток сілай I_1 стварае магнітнае поле індукцыяй $\vec{B}_1$, якое дзейнічае



Рыс. 212

на праваднік з токам I_2 сілай, модуль якой $F_{12} = B_1 I_2 \Delta l$. Ток I_2 стварае магнітнае поле, індукцыя якога $\vec{B}_2$. Гэтае поле дзейнічае на праваднік з токам I_1 сілай, модуль якой $F_{21} = B_2 I_1 \Delta l$. Сілы $\vec{F}_{12}$ і $\vec{F}_{21}$ знаходзяцца ў той жа плоскасці, што і праваднікі з токам, і з'яўляюцца сіламі прыцяжэння, калі токі накіраваны ў адзін бок (рыс. 212, *а*), і сіламі адштурхвання, калі токі накіраваны ў супрацьлеглыя бакі (рыс. 212, б) (праверце гэта самастойна, выкарыстаўшы правіла свярдзёлка (або правіла правай рукі) для вызначэння напрамкаў індукцый магнітных палёў $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ і правіла левай рукі для вызначэння напрамкаў сіл Ампера).

Прынцып суперпазіцыі магнітных палёў. Калі магнітнае поле ствараецца некалькімі крыніцамі, то індукцыю выніковага магнітнага поля можна вызначыць паводле *прынцыпу суперпазіцыі*: **калі магнітнае поле ў некаторым пункце прасторы ствараецца не адным, а некалькімі электрычнымі токамі (або зарадамі, якія рухаюцца), то індукцыя выніковага магнітнага поля ў гэтым пункце роўная вектарнай суме індукцый магнітных палёў, створаных кожным токам (зарадам, які рухаецца)**:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \ldots + \vec{B}_n. \quad (31.3)$$

Магнітныя палі, створаныя рознымі крыніцамі. Для таго каб разлічыць індукцыю выніковага магнітнага поля на падставе прынцыпу суперпазіцыі, неабходна ўмець вызначаць індукцыі магнітных палёў, створаных рознымі крыніцамі. Эксперыменты паказваюць, што ва ўсіх выпадках модуль індукцыі магнітнага поля, створанага токам, прапарцыянальны сіле току, залежыць ад даўжыні і формы правадніка з токам і адлегласці да выбранага пункта. Залежнасць індукцыі магнітнага поля прамалінейнага правадніка з токам ад адлегласці да яго эксперыментальна даследавалі французскія вучоныя Жан Батыст Біо (1774—1862) і Фелікс Савар (1791—1841) у 1820 г. Французскі вучоны П'ер Сімон Лаплас (1749—1827), прааналізаваўшы эксперыментальныя даныя, атрыманыя Біо і Саварам, прапанаваў выкарыстоўваць элемент току (аналаг пунктавага зараду ў электрастатыцы), што дазволіла сфармуляваць закон, які атрымаў назву закона Біо—Савара—Лапласа.

Закон, атрыманы Біо, Саварам і Лапласам, дазваляе, у прыватнасці, разлічыць модуль індукцыі магнітнага поля, створанага пастаянным токам

сілай I, які праходзіць па кругавым вітку (што знаходзіцца ў вакууме або паветры) радыусам R, у цэнтры гэтага вітка па формуле

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}, \qquad (31.4)$$

дзе $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$ — магнітная пастанная.

Модуль індукцыі магнітнага поля, створанага пастаянным токам сілай I, які праходзіць па бясконца доўгім прамалінейным праваднiку (што знаходзіцца ў вакууме або паветры), у пунктах, размешчаных на адлегласці r ад восі праваднiка, вызначаюць па формуле

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \qquad (31.5)$$

якая адпавядае вынікам эксперыментаў, праведзеных Біо і Саварам.

Модуль індукцыі магнітнага поля, створанага пастаянным токам сілай I, унутры доўгага саленоіда, што знаходзіцца ў вакууме або паветры, можна вызначыць па формуле

$$B = \mu_0 n I,$$

дзе $n = \frac{N}{l}$ — колькасць віткоў на адзінку даўжыні саленоіда.

Няхай адлегласць паміж тонкімі доўгімі паралельнымі прамалінейнымі праваднікамі з токам r (гл. рыс. 212). Тады модуль індукцыі магнітнага поля, створанага токам сілай I_1 першага праваднiка ў тых пунктах прасторы, дзе знаходзіцца другі праваднік, $B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$. Адпаведна модуль індукцыі магнітнага поля току сілай I_2 другога праваднiка ў тых пунктах прасторы, дзе размешчаны першы праваднік, $B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r}$. Таму $F_{12} = F_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \Delta l}{2\pi r}$, г. зн. сілы ўзаемадзеяння паралельных праваднікоў з токам падпарадкоўваюцца трэцяму закону Ньютона.

Адзначым, што ўзаемадзеянне асобных элементаў току не падпарадкоўваецца трэцяму закону Ньютона, таму што магнітныя сілы $\vec{F}_1$ і $\vec{F}_2$ у агульным выпадку не ляжаць на адной прамой. Аднак для сіл узаемадзеяння замкнутых контураў, якія складаюцца з праваднікоў з токамі, трэці закон Ньютона выконваецца, г. зн. $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

1. Індукцыя магнітнага поля — фізічная вектарная велічыня, модуль якой роўны адносіне модуля максімальнай сілы, якая дзейнічае з боку магнітнага поля на прамалінейны ўчастак праваднiка з токам, да здабытку сілы току і даўжыні гэтага ўчастка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}.$$

2. 1 Тл — магнітная індукцыя такога аднароднага магнітнага поля, якое на прамалінейны ўчастак правадніка даўжынёй 1 м пры сіле току ў ім 1 А дзейнічае максімальнай сілай, модуль якой 1 Н:

$$1\,\text{Тл} = 1\,\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

3. Модуль сілы Ампера можна разлічыць па формуле

$$F_\text{А} = BI\Delta l \sin\alpha,$$

дзе α — вугал паміж напрамкамі току і індукцыі магнітнага поля.

4. Напрамак сілы Ампера вызначаюць паводле правіла левай рукі: калі левую руку размясціць так, каб перпендыкулярная да правадніка складаючая індукцыі магнітнага поля $B_\perp$ уваходзіла ў далонь, чатыры выцягнутыя пальцы былі накіраваны па току, то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак сілы Ампера, якая дзейнічае на ўчастак правадніка з токам.

5. Калі магнітнае поле ў пэўным пункце прасторы ствараецца не адным, а некалькімі электрычнымі токамі (або зарадамі, якія рухаюцца), то індукцыя выніковага магнітнага поля ў гэтым пункце роўная вектарнай суме індукцый магнітных палёў, створаных кожным токам (зарадам, які рухаецца) (прынцып суперпазіцыі):

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \ldots + \vec{B}_n.$$

?

1. Якая фізічная велічыня характарызуе магнітнае поле ў кожным яго пункце?

2. Як вызначаюць модуль індукцыі магнітнага поля? У якіх адзінках вымяраюць індукцыю магнітнага поля?

3. Як вызначаюць модуль сілы Ампера? Пры якім значэнні вугла паміж напрамкамі току ў правадніку і магнітнай індукцыі модуль сілы, якая дзейнічае на праваднік з токам з боку магнітнага поля, максімальны? роўны нулю?

4. Як вызначыць напрамак сілы Ампера?

5. У аднародным магнітным полі перпендыкулярна лініям індукцыі размешчаны праваднік з токам, сагнуты пад прамым вуглом. Пад якім вуглом адна да адной накіраваны сілы Ампера, што дзейнічаюць на стораны гэтага вугла?

6*. Прамалінейны праваднік даўжынёй l, па якім праходзіць ток сілай I, размешчаны ўздоўж восі Ox у аднародным магнітным полі, індукцыя $\vec{B}$ якога накіравана ўздоўж восі Oy. Чаму роўная праекцыя сілы Ампера на вось Ox?

7. Сфармулюйце прынцып суперпазіцыі магнітных палёў.

8. Як вызначыць модуль індукцыі магнітнага поля доўгага прамалінейнага правадніка з токам? кругавога вітка з токам?

Прыклады рашэння задач

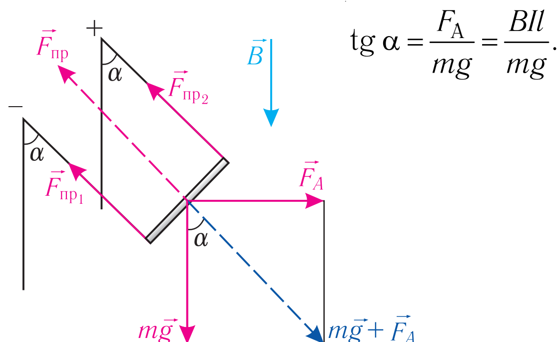
Прыклад 1. У аднародным магнітным полі, індукцыя якога накіравана вертыкальна і яе модуль $B = 0{,}50$ Тл, на лёгкіх правадах гарызантальна падвешаны прамалінейны металічны стрыжань даўжынёй $l = 0{,}20$ м і масай $m = 50$ г. Вызначце, на які вугал ад вертыкалі адхіляцца правады, што падтрымліваюць стрыжань, калі па ім прапусціць ток сілай $I = 5{,}0$ А. Уздзеянне магнітнага поля на ток у падводзячых правадах не прымаць пад увагу.

Дадзена:
$B = 0{,}50$ Тл
$l = 0{,}20$ м
$m = 50$ г $= 0{,}050$ кг
$I = 5{,}0$ А

α — ?

Рашэнне. На стрыжань дзейнічаюць сілы пругкасці правадоў $\vec{F}_{\text{пр}} = \vec{F}_{\text{пр}_1} + \vec{F}_{\text{пр}_2}$, сіла цяжару $m\vec{g}$ і сіла Ампера $\vec{F}_{\text{А}}$ (рыс. 213). Модуль гэтай сілы вызначаюць па законе Ампера: $F_{\text{А}} = BIl$. Пры раўнавазе стрыжня вектарная сума сіл роўная нулю: $\vec{F}_{\text{пр}} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{А}} = \vec{0}$. З рысунка 213 вынікае:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{F_{\text{А}}}{mg} = \frac{BIl}{mg}.$$



Рыс. 213

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{0{,}50\ \text{Тл} \cdot 5{,}0\ \text{А} \cdot 0{,}20\ \text{м}}{0{,}050\ \text{кг} \cdot 9{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 1{,}0; \text{ такім чынам, } \alpha = 45^\circ.$$

Адказ: $\alpha = 45^\circ$.

Прыклад 2. Па двух аднолькавых кругавых вітках радыусам $R = 6{,}28$ см кожны, плоскасці якіх узаемна перпендыкулярныя, а цэнтры супадаюць, пра-

ходзяць аднолькавыя токі сілай $I = 4{,}0$ А. Вызначце модуль індукцыі магнітнага поля ў цэнтры віткоў. Віткі знаходзяцца ў паветры.

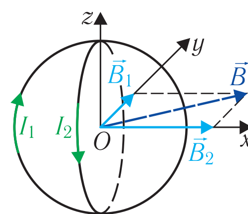
Дадзена:
$R = 6{,}28$ см $= 6{,}28 \cdot 10^{-2}$ м
$I_1 = I_2 = I = 4{,}0$ А

B — ?

Рашэнне. Модуль індукцыі магнітнага поля, створанага кожным кругавым токам у цэнтры адпаведнага вітка, знойдзем па формуле (31.4)

$$B_1 = B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Паводле правіла свярдзёлка для выбраных напрамкаў токаў у вітках індукцыя $\vec{B}_1$ накіравана перпендыкулярна плоскасці рысунка ад нас, а індукцыя $\vec{B}_2$ — управа (рыс. 214). Згодна з прынцыпам суперпазіцыі (31.3) індукцыя выніковага магнітнага поля $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$. Паколькі індукцыі магнітных палёў узаемна перпендыкулярныя, па тэарэме Піфагора знаходзім: $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = B\sqrt{2}$,



Рыс. 214

тады $B = \dfrac{\mu_0 I \sqrt{2}}{2R}$.

$$B = \frac{4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7}\ \dfrac{\text{Н}}{\text{А}^2} \cdot 4{,}0\ \text{А} \cdot 1{,}41}{2 \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-2}\ \text{м}} = 5{,}6 \cdot 10^{-5}\ \text{Тл} = 56\ \text{мкТл}.$$

Адказ: $B = 56$ мкТл.

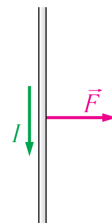
Практыкаванне 22

1. Прамалінейны праваднік даўжынёй $l = 40$ см, па якім праходзіць электрычны ток сілай $I = 8{,}0$ А, знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 0{,}50$ Тл. Вызначце найбольшае і найменшае значэнні модуля сілы, якая дзейнічае на праваднік з боку магнітнага поля.

2. Прамалінейны праваднік даўжынёй $l = 1{,}5$ м знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 0{,}20$ Тл. Сіла току ў праводніку $I = 3{,}0$ А. Вызначце вугал паміж напрамкамі току і індукцыі магнітнага поля, калі на праваднік дзейнічае сіла Ампера, модуль якой $F_A = 0{,}64$ Н.

3. Прамалінейны праваднік даўжынёй $l = 50$ см, па якім праходзіць ток сілай $I = 2{,}0$ А, размешчаны перпендыкулярна лініям індукцыі аднароднага

магнітнага поля (рыс. 215). На праваднік з боку магнітнага поля дзейнічае сіла, модуль якой $F = 0,40$ Н. Вызначце модуль і напрамак індукцыі магнітнага поля.



Рыс. 215

4. Прамалінейны праваднік з плошчай папярочнага сячэння $S = 0,10$ см^2 знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 0,20$ Тл. Пры праходжанні па праваднiку току сілай $I = 3,9$ А на яго дзейнічае максімальна магчымая для дадзенага магнітнага поля сіла Ампера. Вызначце шчыльнасць рэчыва правадніка, калі модуль сілы Ампера роўны модулю сілы цяжару, што дзейнічае на праваднік.

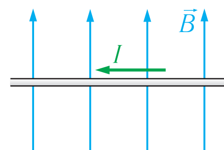
5*. Прамалінейны праваднік даўжынёй $l = 40$ см і масай $m = 20$ г размешчаны гарызантальна і перпендыкулярна лініям індукцыі аднароднага магнітнага поля, модуль індукцыі якога $B = 40$ мТл. Вызначце сілу току, які будзе праходзіць па праваднiку, калі ён заслізгае па праводных шынах без трэння з накіраваным вертыкальна ўніз паскарэннем, модуль якога $a = 1,0\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

6. Магнітнае поле створана накладаннем двух аднародных магнітных палёў, модулі індукцыі якіх $B_1 = 0,03$ Тл і $B_2 = 0,04$ Тл. Вызначце модуль індукцыі выніковага поля, калі лініі індукцыі гэтых палёў узаемна перпендыкулярныя.

7. Магнітнае поле, модуль індукцыі якога $B_1 = 0,03$ Тл, створана накладаннем двух аднародных магнітных палёў. Вызначце максімальна магчымае значэнне модуля індукцыі першага поля, калі модуль індукцыі другога поля $B_2 = 0,02$ Тл.

8. Магнітнае поле, модуль індукцыі якога $B = 0,02$ Тл, створана накладаннем двух аднародных магнітных палёў. Вызначце мінімальна магчымае значэнне модуля індукцыі другога поля, калі модуль індукцыі першага поля $B_1 = 0,05$ Тл.

9*. Доўгі прамалінейны праваднік з токам сілай $I = 30$ А размешчаны ў паветры перпендыкулярна лініям індукцыі аднароднага магнітнага поля (рыс. 216), модуль індукцыі якога $B = 0,20$ мТл. Вызначце геаметрычнае месца пунктаў, у якіх індукцыя выніковага магнітнага поля роўная нулю.



Рыс. 216

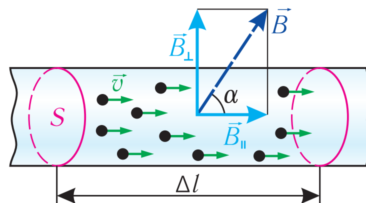
10*. Па двух бясконца доўгіх паралельных прамалінейных правадніках, размешчаных на адлегласці $r = 50$ см адзін ад аднаго, праходзяць у адным напрамку токі сіламі $I_1 = 4,0$ А і $I_2 = 8,0$ А. Вызначце модуль індукцыі выніковага магнітнага поля ў пунктах, аддаленых на адлегласць $r_1 = 40$ см ад першага правадніка і $r_2 = 30$ см ад другога.

§ 32. Сіла Лорэнца. Рух зараджаных часціц у магнітным полі

Паколькі электрычны ток уяўляе сабой упарадкаваны рух зараджаных часціц, то гэта азначае, што магнітнае поле, аказваючы дзеянне на праваднік з токам, дзейнічае тым самым на кожную з гэтых зараджаных часціц, якія рухаюцца. Такім чынам, сілу Ампера, модуль якой $F_A = BI\Delta l \sin\alpha$, можна разглядаць як вынік складання сіл, што дзейнічаюць на асобныя зараджаныя часціцы, якія рухаюцца. Сілу, з якой магнітнае поле дзейнічае на зараджаную часціцу, што рухаецца ў гэтым полі, называюць сілай Лорэнца ў гонар выдатнага галандскага фізіка Хендрыка Антона Лорэнца (1853—1928).

Сіла Лорэнца. Модуль сілы Лорэнца можна вызначыць па формуле $F_Л = \frac{F_A}{N}$, дзе N— агульная колькасць свабодных зараджаных часціц на прамалінейным участку правадніка даўжынёй Δl (рыс. 217). Калі модуль зараду адной часціцы q, а модуль сумарнага зараду ўсіх часціц Nq, то згодна з азначэннем сілы току $I = \frac{Nq}{\Delta t}$, дзе Δt — прамежак часу, за які зараджаная часціца праходзіць участак правадніка даўжынёй Δl. Тады

$$F_Л = \frac{BI\Delta l \sin\alpha}{N} = \frac{BNq\Delta l \sin\alpha}{\Delta t N} = \frac{Bq\Delta l \sin\alpha}{\Delta t}.$$



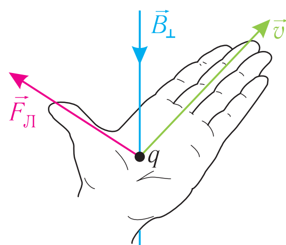
Рыс. 217

Паколькі $\frac{\Delta l}{\Delta t} = v$ — модуль сярэдняй скорасці зараджанай часціцы, якая ўпарадкавана рухаецца ў магнітным полі ўнутры правадніка, то формулу для вызначэння модуля сілы Лорэнца можна запісаць у выглядзе

$$F_Л = Bqv \sin\alpha, \qquad (32.1)$$

дзе α — вугал паміж напрамкамі індукцыі магнітнага поля $\vec{B}$ і скорасці $\vec{v}$ упарадкаванага руху зараджанай часціцы.

Напрамак сілы Лорэнца, якая дзейнічае на зараджаныя часціцы, як і сілы Ампера, вызначаюць паводле *правіла левай рукі: калі левую руку размясціць так, каб складаючая магнітнай індукцыі, перпендыкулярная*

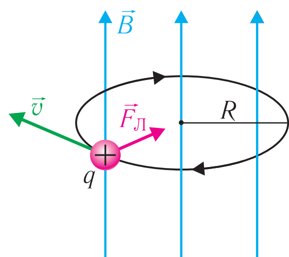


Рыс. 218

скорасці ўпарадкаванага руху зараду, уваходзіла ў далонь, а чатыры пальцы былі накіраваны па руху дадатнага зараду (супраць руху адмоўнага), то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак сілы Лорэнца, якая дзейнічае на зарад (рыс. 218).

Адзначым, што сіла Лорэнца залежыць ад выбару інерцыяльнай сістэмы адліку, паколькі ў розных сістэмах адліку скорасць руху зараду можа адрознівацца.

Рух зараджаных часціц у аднародным магнітным полі. Пад дзеяннем сілы Лорэнца часціцы, якія маюць электрычны зарад, рухаюцца ў магнітным полі па крывалінейных траекторыях. Прычым калі ў дадзенай інерцыяльнай сістэме адліку напрамак скорасці руху часціцы перпендыкулярны напрамку індукцыі магнітнага поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$, $\alpha = 90°$), то траекторыяй руху зараджанай часціцы ў аднародным магнітным полі з'яўляецца акружнасць (рыс. 219). Няхай часціца масай m і зарадам q рухаецца са скорасцю $\vec{v}$, накіраванай перпендыкулярна лініям індукцыі ў аднародным магнітным полі, індукцыя якога $\vec{B}$. Паколькі сіла Лорэнца $\vec{F}_Л$ перпендыкулярная скорасці v руху часціцы (гл. рыс. 219), то гэта сіла змяняе толькі напрамак скорасці, надаючы часціцы цэнтраімклівае паскарэнне, модуль якога ў адпаведнасці з другім законам Ньютона



Рыс. 219

$$a = \frac{F_Л}{m} = \frac{B|q|v}{m}.$$

У выніку часціца рухаецца па акружнасці, радыус якой можна вызначыць з формулы $a = \frac{v^2}{R}$:

$$R = \frac{v^2}{a} = \frac{v^2 m}{B|q|v} = \frac{mv}{B|q|}. \qquad (32.2)$$

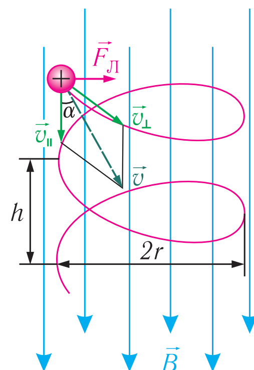
Перыяд T абарачэння часціцы, якая рухаецца па акружнасці ў аднародным магнітным полі:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{B|q|} = \frac{2\pi m}{B|q|}. \qquad (32.3)$$

Як бачна з выразу (32.3), перыяд абарачэння часціцы не залежыць ад модуля скорасці яе руху і радыуса траекторыі, а вызначаецца толькі параметрамі часціцы (модулем яе зараду і масай) і велічынёй магнітнай індукцыі. Гэта выкарыстоўваюць у цыклічных паскаральніках зараджаных часціц — цыклатронах.

На часціцу, якая рухаецца ўздоўж лініі індукцыі магнітнага поля, сіла Лорэнца не дзейнічае ($\sin\alpha = 0$).

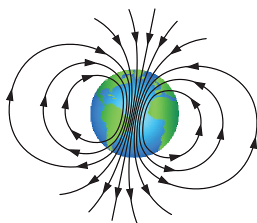
Калі зараджаная часціца рухаецца ў аднародным магнітным полі так, што напрамак яе скорасці $\vec{v}$ утварае з індукцыяй магнітнага поля $\vec{B}$ вугал α, прычым $\alpha \neq 0$, $\alpha \neq \pi$, то траекторыя руху часціцы ўяўляе сабой спіральную лінію (рыс. 220). Пры гэтым радыус R спіральнай лініі залежыць ад модуля складаючай скорасці $v_{\perp}$, перпендыкулярнай індукцыі магнітнага поля, а крок спіральнай лініі h — ад модуля складаючай скорасці $v_{||}$, паралельнай магнітнай індукцыі. Такім чынам, траекторыя зараджанай часціцы нібы навіваецца на лініі магнітнай індукцыі.



Рыс. 220

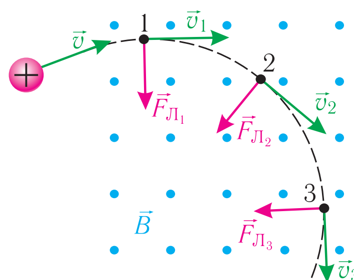
Падобная з'ява адбываецца ў магнітным полі Зямлі, якое ахоўвае ўсё жывое ад патокаў зараджаных часціц з касмічнай прасторы. Зараджаныя часціцы з космасу, якія рухаюцца з велізарнымі скарасцямі, «захопліваюцца» магнітным полем Зямлі і ўтвараюць так званыя радыяцыйныя паясы (рыс. 221), у якіх часціцы перамяшчаюцца па спіралепадобных траекторыях паміж паўночным і паўднёвым магнітнымі полюсамі туды і назад за час, роўны прыкладна долям секунды. Толькі ў палярных абласцях некаторая частка часціц урываецца ў верхнія слаі атмасферы, выклікаючы палярныя ззянні (рыс. 222).

Паколькі сіла Лорэнца накіравана пад вуглом 90° да скорасці руху зараджаных часціц у кожным пункце траекторыі (рыс. 223), то работа гэтай сілы пры руху



Рыс. 221

Рыс. 222



Рыс. 223

зараджанай часціцы ў магнітным полі роўная нулю. Таму кінетычная энергія часціцы, якая рухаецца ў стацыянарным (нязменным у часе) магнітным полі, не змяняецца, г. зн. стацыянарнае магнітнае поле нельга выкарыстоўваць для паскарэння зараджаных часціц. Павелічэнне кінетычнай энергіі часціцы, г. зн. яе паскарэнне, магчыма пад дзеяннем электрычнага поля (у гэтым выпадку змяненне кінетычнай энергіі часціцы роўнае рабоце сіл поля). Таму ў сучасных паскаральніках зараджаных часціц электрычнае поле выкарыстоўваюць для паскарэння, а магнітнае — для «фарміравання» траекторыі руху зараджаных часціц.

Калі зараджаная часціца ў момант узнікнення знешняга электрычнага поля знаходзілася ў спакоі, то $\frac{mv^2}{2} = qU$, дзе U — напружанне паміж пунктамі, у якіх знаходзілася часціца ў моманты ўзнікнення знешняга электрычнага поля і выхаду з яго, q — модуль зараду часціцы. Таму модуль скорасці часціцы пры выхадзе з электрычнага поля

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}. \qquad (32.4)$$

Калі пасля гэтага часціца трапляе ў аднароднае магнітнае поле, індукцыя якога перпендыкулярная яе скорасці, то радыус акружнасці, па дузе якой будзе рухацца часціца, $R = \frac{mv}{Bq}$, адкуль

$$\frac{q}{m} = \frac{2U}{R^2B^2}.$$

Велічыню $\frac{q}{m}$ называюць удзельным зарадам часціцы. Таму, калі доследным шляхам вызначыць радыус траекторыі часціцы ў магнітным полі, то, ведаючы індукцыю магнітнага поля і паскараючае напружанне электрычнага поля, можна разлічыць удзельны зарад часціцы. Гэты метад і выкарыстоўваюць пры канструяванні прыбораў, якія называюць мас-спектрометрамі.

1. Сілу, з якой магнітнае поле дзейнічае на зарад, які рухаецца ў гэтым полі, называюць сілай Лорэнца. Модуль сілы Лорэнца вызначаюць па формуле

$$F_{Л} = B|q|v\sin\alpha.$$

2. Напрамак сілы Лорэнца вызначаюць паводле правіла левай рукі: калі левую руку размясціць так, каб складаючая магнітнай індукцыі, пер-

пендыкулярная скорасці руху зараду, уваходзіла ў далонь, а чатыры пальцы былі накіраваны па руху дадатнага зараду (супраць руху адмоўнага), то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак сілы Лорэнца, якая дзейнічае на зарад.

3. Работа сілы Лорэнца пры руху зараджанай часціцы ў нязменным у часе магнітным полі роўная нулю.

4. Калі ў дадзенай інерцыяльнай сістэме адліку скорасць руху зараджанай часціцы перпендыкулярная індукцыі магнітнага поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$), то траекторыяй руху часціцы ў аднародным магнітным полі з'яўляецца акружнасць. Перыяд абарачэння часціцы не залежыць ад скорасці яе руху і радыуса траекторыі, а вызначаецца толькі модулем яе зараду і масай і значэннем магнітнай індукцыі.

?

1. Як вызначыць модуль сілы, што дзейнічае з боку магнітнага поля на зараджаную часціцу, якая ў ім рухаецца?

2. Як вызначаюць напрамак сілы Лорэнца?

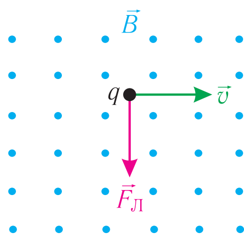
3. Зараджаная часціца рухаецца ў аднародным магнітным полі са скорасцю, накіраванай перпендыкулярна лініям індукцыі. Па якой траекторыі рухаецца часціца?

4. Чаму сіла Лорэнца змяняе напрамак скорасці часціцы, але не ўплывае на яе модуль?

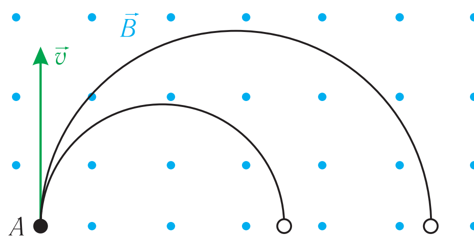
5. Ад чаго залежыць перыяд абарачэння зараджанай часціцы ў аднародным магнітным полі?

6. На рысунку 224 паказаны напрамкі скорасці руху часціцы, модуль зараду якой q, і сілы Лорэнца, што дзейнічае на часціцу з боку магнітнага поля, індукцыя якога накіравана перпендыкулярна плоскасці рысунка на назіральніка. Вызначце знак зараду часціцы.

7*. Па рысунку 225 паказаны траекторыі руху дзвюх часціц, якія маюць аднолькавыя зарады. Часціцы ўлятаюць ў аднароднае магнітнае поле з аднаго пункта A з аднолькавымі скарасцямі. Вызначце знак зараду часціц. Растлумачце прычыну несупадзення траекторый іх руху.



Рыс. 224



Рыс. 225

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Электрон рухаецца ў аднародным магнітным полі па акружнасці радыусам $R = 12$ см са скорасцю, модуль якой значна меншы за модуль скорасці святла. Вызначце модуль імпульса электрона, калі модуль індукцыі магнітнага поля $B = 0{,}020$ Тл.

Дадзена:
$R = 12$ см $= 0{,}12$ м
$B = 0{,}020$ Тл

p — ?

Рашэнне. Модуль імпульса электрона $p = mv$, дзе m — маса электрона, v — модуль скорасці яго руху. На электрон у магнітным полі дзейнічаюць сіла Лорэнца і сіла цяжару, модуль якой у шмат разоў меншы за модуль сілы Лорэнца. Таму дзеянне сілы цяжару на зараджаную часціцу, якая рухаецца ў магнітным полі, можна не прымаць пад увагу. Згодна з другім законам Ньютана $\frac{mv^2}{R} = Bev$, адкуль $v = \frac{BeR}{m}$, дзе $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл — модуль зараду электрона. Значыць, $p = m\frac{BeR}{m} = BeR$.

$$p = 0{,}020\ \text{Тл} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл} \cdot 0{,}12\ \text{м} = 3{,}8 \cdot 10^{-22}\ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Адказ: $p = 3{,}8 \cdot 10^{-22}\ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

Прыклад 2. Электрон, паскораны са стану спакою ў электрастатычным полі рознасцю патэнцыялаў $U = 270$ В, рухаецца паралельна тонкаму доўгаму прамалінейнаму правадніку, які знаходзіцца ў вакууме, на адлегласці $r = 5{,}0$ мм ад яго. Вызначце модуль сілы, якая пачне дзейнічаць на электрон, калі па правадніку пусціць электрычны ток сілай $I = 10$ А, а таксама радыус крывізны яго траекторыі ў пачатку скрыўленага ўчастка. Маса электрона $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Дадзена:
$U = 270$ В
$r = 5{,}0$ мм $= 5{,}0 \cdot 10^{-3}$ м
$I = 10$ А
$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг

$F_Л$ — ?
R — ?

Рашэнне. Пры разгоне электрона $eU = \frac{m_e v^2}{2}$. Адсюль модуль скорасці, да якой разагналі электрон, $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$, дзе e — модуль зараду электрона. Раўнамерны прамалінейны рух электрона паралельна тонкаму доўгаму прамалінейнаму правадніку змяніўся на раўнамерны крывалінейны, як толькі па

правадніку пачаў праходзіць электрычны ток і на электрон падзейнічала сіла Лорэнца, модуль якой $F_Л = Bev$.

Модуль індукцыі магнітнага поля, створанага тонкім доўгім прамалінейным правадніком з токам, $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$.

Тады $F_Л = e\,\frac{\mu_0 I}{2\pi r}\sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$.

$$F_Л = 1{,}6\cdot10^{-19}\ Кл\cdot4\cdot3{,}14\cdot10^{-7}\,\frac{Н}{А^2}\cdot\frac{10\ А}{2\cdot3{,}14\cdot5{,}0\cdot10^{-3}\ м}\sqrt{\frac{2\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\ Кл\cdot270\ В}{9{,}1\cdot10^{-31}\ кг}} = 6{,}2\cdot10^{-16}\ Н.$$

Як толькі з'яўляецца магнітнае поле, якое ствараецца правадніком з токам, электрон працягвае рухацца, але ўжо з цэнтраімклівым паскарэннем: $\vec{F}_Л = m_e\vec{a}$. Тады $F_Л = m_e\frac{v^2}{R}$, адкуль $R = \frac{m_e v^2}{F_Л} = \frac{2eU}{F_Л}$.

$$R = \frac{2\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\ Кл\cdot270\ В}{6{,}2\cdot10^{-16}\ Н} = 0{,}14\ м.$$

Адказ: $F_Л = 6{,}2\cdot10^{-16}$ Н, $R = 0{,}14$ м.

Практыкаванне 23

1. Электрон рухаецца са скорасцю, модуль якой $v = 2{,}0\cdot10^8\ \frac{см}{с}$, перпендыкулярна лініям магнітнай індукцыі аднароднага магнітнага поля, модуль індукцыі якога $B = 1{,}6$ мТл. Вызначце модуль сілы, што дзейнічае на электрон у магнітным полі.

2. Электрон рухаецца ў аднародным магнітным полі па акружнасці, радыус якой $R = 8{,}0$ мм. Вызначце модуль індукцыі магнітнага поля, калі модуль скорасці руху электрона $v = 4{,}0\cdot10^6\ \frac{м}{с}$. Маса электрона $m_e = 9{,}1\cdot10^{-31}$ кг.

3. Пылінка з зарадам $q = 1{,}6$ нКл і масай $m = 0{,}80$ мг рухаецца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 1{,}0$ Тл, перпендыкулярна лініям індукцыі. Вызначце перыяд абарачэння пылінкі.

4. Электрон рухаецца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 2{,}0$ мТл, па акружнасці радыусам $R = 2{,}0$ см. Вызначце кінетычную энергію электрона. Маса электрона $m_e = 9{,}1\cdot10^{-31}$ кг.

5. Вызначце, якую паскараючую рознасць патэнцыялаў павінен прайсці са стану спакою электрон, каб у аднародным магнітным полі з модулем індукцыі $B = 50$ мТл на яго дзейнічала сіла Лорэнца, модуль якой $F_Л = 8{,}0 \cdot 10^{-14}$ Н. У магнітнае поле электрон ўлятае перпендыкулярна лініям індукцыі. Маса электрона $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

6*. Зараджаная часціца рухаецца ў прасторы з узаемна перпендыкулярнымі аднароднымі электрычным і магнітным палямі. Модулі напружанасці электрычнага поля і індукцыі магнітнага адпаведна $E = 0{,}24\ \frac{кВ}{м}$ і $B = 0{,}04$ Тл. Вызначце модуль скорасці раўнамернага руху зараджанай часціцы. Дзеянне сілы цяжару на часціцу не прымайце пад увагу.

§ 33. Магнітны паток. З'ява электрамагнітнай індукцыі. Правіла Ленца

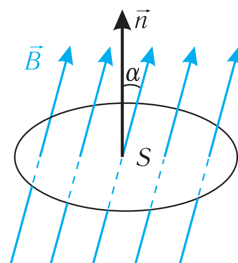
Пасля доследаў Эрстэда і Ампера стала зразумела, што электрычныя і магнітныя палі маюць адны і тыя ж крыніцы — электрычныя зарады, якія рухаюцца. Гэта дазволіла выказаць меркаванне, што яны нейкім чынам звязаны адно з адным. Фарадэй быў абсалютна ўпэўнены ў адзінстве электрычных і магнітных з'яў. У хуткім часе пасля адкрыцця Эрстэда ў сваім дзённіку ў снежні 1821 г. ён запісаў: «Ператварыць магнетызм у электрычнасць». На вырашэнне гэтай фундаментальнай задачы яму спатрэбілася дзесяць гадоў. Пасля шматлікіх эксперыментаў Фарадэй зрабіў эпахальнае адкрыццё: замыкаючы і размыкаючы электрычны ланцуг адной шпулі, ён у замкнутым ланцугу другой шпулі атрымаў электрычны ток. Назіраемую з'яву Фарадэй назваў электрамагнітнай індукцыяй.

Магнітны паток. Індукцыя магнітнага поля характарызуе магнітнае поле ў канкрэтным пункце прасторы. Каб ахарактарызаваць магнітнае поле ва ўсіх пунктах паверхні, абмежаванай замкнутым контурам, уводзяць фізічную велічыню, якую называюць магнітным патокам (патокам магнітнай індукцыі).

Магнітным патокам Ф праз плоскую паверхню, якая знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, называюць фізічную скалярную велічыню, роўную здабытку модуля індукцыі *B* магнітнага поля, плошчы *S* паверхні

і косінуса вугла α паміж напрамкамі нармалі да гэтай паверхні і магнітнай індукцыі (рыс. 226):

$$\Phi = BS\cos\alpha. \qquad (33.1)$$



Рыс. 226

За адзінку магнітнага патоку ў СІ прыняты вебер (Вб). 1 Вб — магнітны паток аднароднага магнітнага поля індукцыяй 1 Тл праз плоскую паверхню плошчай 1 м^2, размешчаную перпендыкулярна індукцыі магнітнага поля.

З формулы (33.1) бачна, што магнітны паток залежыць ад узаемнай арыентацыі ліній магнітнай індукцыі і нармалі да плоскай паверхні. Паток максімальны, калі $\alpha = 0$, г. зн. калі паверхня перпендыкулярная лініям індукцыі магнітнага поля:

$$\Phi_{max} = BS.$$

Калі плоская паверхня паралельная лініям індукцыі ($\alpha = 90°$), то паток праз яе роўны нулю.

На практыцы часта сустракаюцца сітуацыі, калі лініі магнітнай індукцыі перасякаюць паверхні, абмежаваныя не адным контурам, а некалькімі. Так, напрыклад, лініі магнітнай індукцыі могуць перасякаць паверхні, абмежаваныя віткамі саленоіда, якія «паралельныя» адзін аднаму і маюць аднолькавую плошчу паверхні. У гэтым выпадку магнітны паток вызначаюць па формуле

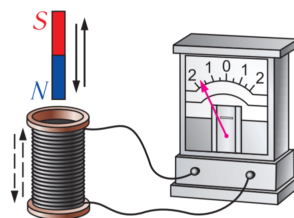
$$\Phi = NBS,$$

дзе N — колькасць віткоў саленоіда, S — плошча паверхні, абмежаванай кожным вітком.

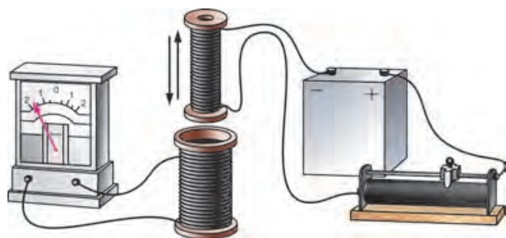
Змяніць магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, можна, змяняючы: 1) індукцыю магнітнага поля, у якім знаходзіцца контур; 2) памеры гэтага контуру; 3) арыентацыю контуру ў магнітным полі.

З’ява электрамагнітнай індукцыі. У 1831 г. Фарадэй правёў серыю доследаў, якія дазволілі ўстанавіць наступныя факты:

– пры руху пастаяннага магніта адносна шпулі, падключанай да гальванометра, у шпулі ўзнікаў электрычны ток (стрэлка гальванометра адхілялася). Прычым напрамак току змяняўся на супрацьлеглы пры змене напрамку руху магніта. Гэтая ж з’ява назіралася, калі магніт быў нерухомы, а рухалі шпулю (рыс. 227);



Рыс. 227

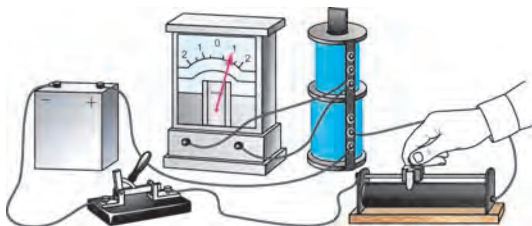


Рыс. 228

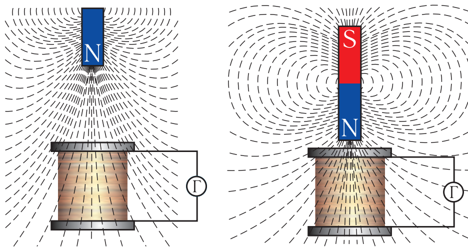
— у шпулі, падключанай да гальванометра, узнікаў электрычны ток, калі адносна яе рухалі другую шпулю, якая была падключана да крыніцы пастаяннага току (рыс. 228);

— калі дзве шпулі наматаныя на агульны каркас і адну падключалі да гальванометра, а другую — да крыніцы току, то ток ў першай шпулі ўзнікаў пры змяненні току ў другой (рыс. 229).

Ва ўсіх разгледжаных выпадках электрычны ток у ланцугу гальванометра ўзнікаў толькі пры змяненні магнітнага патоку праз паверхні, абмежаваныя віткамі шпулі, падключанай да гальванометра (рыс. 230). Прычым значэнне сілы току, які ўзнікаў у контуры, не залежала ад спосабу змянення магнітнага патоку, а вызначалася толькі скорасцю яго змянення.



Рыс. 229



Рыс. 230

Электрычны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры пры любым змяненні магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам, называюць *індукцыйным токам*.

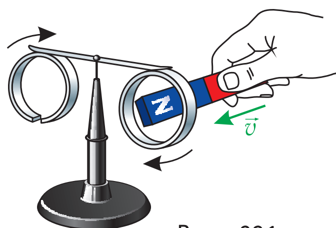
Як вы ўжо ведаеце, для існавання току ў замкнутым электрычным ланцугу неабходна, каб на свабодныя зараджаныя часціцы дзейнічалі пабочныя сілы, г. зн. у ланцугу павінна быць крыніца ЭРС. Відавочна, што ў доследах Фарадэя крыніцай гэтых пабочных сіл з'яўляўся магнітны паток, змяненне якога з цягам часу стварае ў ланцугу ЭРС. Гэту ЭРС называюць *электрарухаючай сілай індукцыі* або *ЭРС індукцыі*. Калі ланцуг замкнуты, ЭРС індукцыі стварае індукцыйны ток, г. зн. узнікненне індукцыйнага току з'яўляецца другасным эфектам.

З’ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў контуры, які або знаходзіцца ў спакоі ў магнітным полі, якое змяняецца ў часе, або рухаецца ў пастаянным магнітным полі так, што магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, змяняецца, называюць электрамагнітнай індукцыяй.

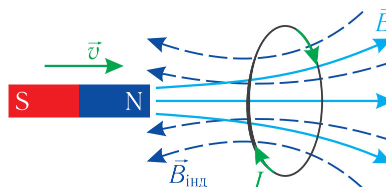
Напрамак індукцыйнага току. Доследы Фарадэя паказалі, што напрамак індукцыйнага току, выкліканага ўзрастаннем магнітнага патоку, быў супрацьлеглы напрамку індукцыйнага току, выкліканага яго змяншэннем. Даследаваўшы з’яву электрамагнітнай індукцыі, пецярбургскі акадэмік Эмілій Хрысціянавіч Ленц (1804—1865) у 1833 г. сфармуляваў правіла для вызначэння напрамку індукцыйнага току. Згодна з гэтым правілам **індукцыйны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры, мае такі напрамак, што створаны ім магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, супрацьдзейнічае змяненню магнітнага патоку, якім выклікаецца гэты індукцыйны ток.** Гэта азначае, што пры ўзрастанні магнітнага патоку магнітнае поле індукцыйнага току накіравана супраць знешняга поля, а пры змяншэнні — магнітнае поле індукцыйнага току накіравана так жа, як і знешняе поле.

У больш сціслай форме правіла Ленца можна сфармуляваць наступным чынам: індукцыйны ток заўсёды накіраваны так, што яго дзеянне супрацьлеглае дзеянню прычыны, якая выклікала гэты ток.

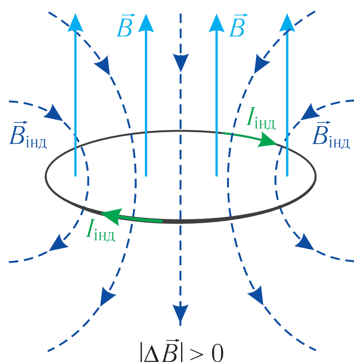
Правіла Ленца можна праілюстраваць, выкарыстаўшы два алюмініевыя кальцы (адно з іх з разрэзам), замацаваныя на стрыжні, які свабодна верціцца вакол вертыкальнай восі (рыс. 231). Дослед паказвае, што пры набліжэнні пастаяннага магніта да суцэльнага кальца яно адштурхваецца ад магніта; пры аддаленні магніта кальцо прыцягваецца да яго. Адштурхванне і прыцяжэнне суцэльнага кальца тлумачаць узнікненнем у ім індукцыйнага току пры змяненні магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную кальцом. Відавочна, што пры набліжэнні магніта да кальца напрамак індукцыйнага току такі, што індукцыя магнітнага поля току супрацьлеглая індукцыі магнітнага поля пастаяннага магніта (рыс. 232). Пры аддаленні магніта індукцыі магнітных палёў току і магніта супадаюць па напрамку. Пры руху магніта



Рыс. 231



Рыс. 232



Рыс. 233

адносна кальца з разрэзам узаемадзеянне не назіраецца, бо індукцыйны ток адсутнічае.

Каб вызначыць напрамак індукцыйнага току паводле правіла Ленца, неабходна выканаць наступныя аперацыі:

1) вызначыць напрамак ліній індукцыі знешняга магнітнага поля $\vec{B}$;

2) высветліць, павялічваецца або памяншаецца магнітны паток праз паверхню, абмежаваную праводным контурам;

3) вызначыць напрамак ліній індукцыі магнітнага поля індукцыйнага току $\vec{B}_{\text{інд}}$: калі змяненне магнітнага патоку $\Delta\Phi < 0$, то напрамак індукцый знешняга магнітнага поля $\vec{B}$ і магнітнага поля індукцыйнага току $\vec{B}_{\text{інд}}$ супадаюць, калі $\Delta\Phi > 0$, то напрамкі супрацьлеглыя;

4) ведаючы напрамак ліній індукцыі магнітнага поля індукцыйнага току $\vec{B}_{\text{інд}}$ паводле правіла свярдзёлка (правіла гадзіннікавай стрэлкі) вызначыць напрамак індукцыйнага току (рыс. 233).

Правіла Ленца адпавядае закону захавання энергіі ў прымяненні да з'явы электрамагнітнай індукцыі. На самай справе, калі б індукцыйны ток меў іншы напрамак, ён мог бы існаваць без затрат энергіі, што супярэчыць закону захавання энергіі.

Адкрыццё з'явы электрамагнітнай індукцыі мела вялікае значэнне. Была даказана ўзаемасувязь магнітных і электрычных з'яў, што паслужыла ў далейшым адпраўным пунктам для распрацоўкі тэорыі электрамагнітнага поля.

1. Магнітным патокам праз плоскую паверхню называюць фізічную скалярную велічыню, роўную здабытку модуля індукцыі аднароднага магнітнага поля, плошчы паверхні і косінуса вугла паміж напрамкамі магнітнай індукцыі і нармалі да гэтай паверхні:

$$\Phi = BS\cos\alpha.$$

2. З'ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў контуры, які або знаходзіцца ў спакоі ў магнітным полі, якое змяняецца ў часе, або рухаецца ў пастаянным магнітным полі так, што колькасць ліній магнітнай індукцыі, якія пранізваюць контур, змяняецца, называюць электрамагнітнай індукцыяй.

3. Электрычны ток, што ўзнікае ў замкнутым праводным контуры пры любым змяненні магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам, называюць індукцыйным токам.

4. Індукцыйны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры, мае такі напрамак, што створаны ім магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, супрацьдзейнічае змяненню магнітнага патоку, якім выклікаецца гэты індукцыйны ток (правіла Ленца).

?

1. Што называюць магнітным патокам? Што з'яўляецца адзінкай магнітнага патоку ў СІ?

2. Якімі спосабамі можна змяніць магнітны паток праз паверхню?

3. Пры якіх умовах у замкнутым праводным контуры ўзнікае індукцыйны ток?

4. У чым заключаецца з'ява электрамагнітнай індукцыі?

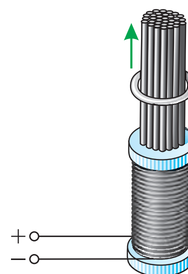
5. Як фармулююць правіла Ленца?

6. Як растлумачыць вынікі доследаў з суцэльным алюмініевым кальцом і пастаянным магнітам, які рухаецца?

7. Як вызначаюць напрамак індукцыйнага току?

8*. У якім выпадку ў замкнутым праводным прамавугольным контуры, які знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, індуцыруецца электрычны ток: а) контур рухаецца паступальна; б) контур верціцца вакол восі, што праходзіць праз адну са старон? Чаму?

9*. Чаму пры замыканні ланцуга шпулі алюмініевае кальцо, надзетае на асяродак, які складаецца з жалезных стрыжняў, што ўстаўлены ў шпулю (рыс. 234), падымаецца ўверх?



Рыс. 234

§ 34. Закон электрамагнітнай індукцыі. Віхравое электрычнае поле

Адкрыўшы з'яву электрамагнітнай індукцыі, Фарадэй практычна за паўтара месяца ўстанавіў усе істотныя заканамернасці гэтай з'явы. Ён зразумеў сутнасць з'явы, якая адыграла такую важную ролю для чалавецтва: ва ўсіх эксперыментах, праведзеных ім, індукцыйны ток у праводным контуры ўзнікаў у выніку змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам. Фарадэй не толькі адкрыў з'яву

электрамагнітнай індукцыі, але і першы прадэманстраваў, «што можна стварыць пастаянны ток электрычнасці пры дапамозе звычайных магнітаў», сканструяваўшы ўніпалярны генератар электрычнага току, які ператвараў механічную энергію ў электрычную.

Закон электрамагнітнай індукцыі. Аналізуючы вынікі доследаў Фарадэя, Максвел у 1873 г. прыйшоў да вываду, што ЭРС індукцыі ў замкнутым праводзячым контуры прапарцыянальная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, г. зн.

$$\mathscr{E}_{\text{інд}} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (34.1)$$

Каб забяспечыць строгую роўнасць у выразе (34.1), неабходна ўлічыць напрамак індукцыйнага току. Згодна з правілам Ленца пры павелічэнні магнітнага патоку $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0\right)$ ЭРС індукцыі адмоўная ($\mathscr{E}_{\text{інд}} < 0$) і, наадварот, пры змяншэнні магнітнага патоку $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0\right)$ ЭРС індукцыі дадатная ($\mathscr{E}_{\text{інд}} > 0$). Тады

$$\mathscr{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (34.2)$$

Такім чынам, **ЭРС электрамагнітнай індукцыі ў контуры роўная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, узятай з супрацьлеглым знакам.**

Выраз (34.2) называюць *законам электрамагнітнай індукцыі Фарадэя*, падкрэсліваючы тым тым самым заслугі вучонага ў вывучэнні гэтай з'явы. Трэба адзначыць, што дадзены закон з'яўляецца ўніверсальным, г. зн. ЭРС індукцыі не залежыць ад спосабу змянення магнітнага патоку.

Згодна з законам Ома для поўнага ланцуга

$$I_{\text{інд}} = \frac{\mathscr{E}_{\text{інд}}}{R},$$

дзе R — супраціўленне праваднікa, з якога выраблены замкнуты праводны контур.

Віхравое электрычнае поле. Як гаварылася вышэй, пры змяненні магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную праводным контурам, у замкнутым нерухомым (адносна выбранай інерцыяльнай сістэмы адліку) контуры ўзнікае электрычны ток. Гэта сведчыць пра тое, што на свабодныя зараджаныя часціцы ў контуры дзейнічаюць сілы. Але для зараджаных

часціц, якія хаатычна рухаюцца, усярэдненае значэнне сілы Лорэнца роўнае нулю, таму на такія часціцы дзеянне аказвае электрычнае поле. Такім чынам, пры любым змяненні магнітнага поля ў навакольнай прасторы ўзнікае электрычнае поле. Менавіта гэтае індукцыйнае электрычнае поле дзейнічае на зараджаныя часціцы, прыводзячы іх ва ўпарадкаваны рух і ствараючы індукцыйны электрычны ток. Падкрэслім, што індукцыйнае электрычнае поле не звязана з электрычнымі зарадамі, яго крыніцай з'яўляецца магнітнае поле, якое змяняецца з часам. Лініі напружанасці індукцыйнага электрычнага току замкнутыя.

Электрычнае поле, якое ўзнікае пры любым змяненні магнітнага поля, называюць *віхравым электрычным полем*.

Віхравы, г. зн. непатэнцыяльны, характар індукцыйнага электрычнага поля з'яўляецца прычынай таго, што пры перамяшчэнні зараду па замкнутым ланцугу сіламі гэтага поля выконваецца работа, не роўная нулю.

Такім чынам, ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў нерухомым замкнутым контуры, што знаходзіцца ў магнітным полі, якое змяняецца з цягам часу, роўная рабоце сіл віхравога электрычнага поля па перамяшчэнні ўздоўж гэтага контуру адзінкавага дадатнага зараду. Калі такі контур аказваецца праводным, то ЭРС індукцыі, што ўзнікла ў ім, прыводзіць да з'яўлення індукцыйнага току.

Максвел у 1873 г. устанавіў, што ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў нерухомым контуры пры змяненні магнітнага поля, не залежыць ад характарыстык гэтага контуру (рэчыва, віду свабодных носьбітаў зараду, супраціўлення, тэмпературы і інш.). На аснове гэтага ён зрабіў вывад, што роля контуру зводзіцца толькі да індыкацыі віхравога электрычнага поля, якое ствараецца пераменным магнітным полем.

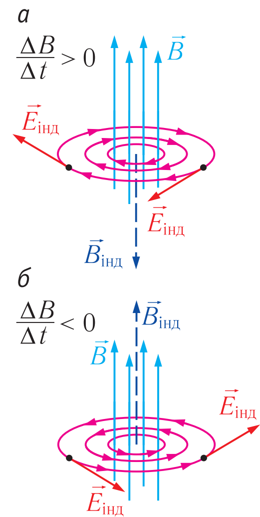
Такім чынам, сутнасць з'явы электрамагнітнай індукцыі заключаецца ў тым, што віхравое электрычнае поле ўзнікае ў любым пункце прасторы, калі ў гэтым пункце існуе магнітнае поле, якое змяняецца з цягам часу, незалежна ад таго, ёсць там праводны контур або няма.

Лініі напружанасці віхравога электрычнага поля ахопліваюць лініі індукцыі магнітнага поля, якое змяняецца з цягам часу. Напрамак ліній напружанасці віхравога электрычнага поля вызначаецца паводле правіла Ленца. Сапраўды, калі змясціць у магнітнае поле, якое змяняецца з цягам часу, замкнуты праводны контур, то па ім у напрамку ліній напружанасці электрычнага поля пойдзе індукцыйны электрычны ток.

Гэты ток стварае індукцыйнае магнітнае поле, індукцыя якога $\vec{B}_{інд}$ паказана на рысунку 235 штрыхавымі лініямі. Яна накіравана так, што індукцыйнае магнітнае поле

супрацьдзейнічае змяненню асноўнага магнітнага поля (правіла Ленца): калі модуль індукцыі асноўнага поля ўзрастае, то $\vec{B}_{інд}$ супрацьлеглая індукцыі асноўнага поля $\vec{B}$ (рыс. 235, *а*); калі модуль індукцыі асноўнага поля змяншаецца, то $\vec{B}_{інд}$ і $\vec{B}$ маюць аднолькавы напрамак (рыс. 235, *б*).

ЭРС індукцыі ўзнікае не толькі ў контуры, які знаходзіцца ў стане спакою адносна пэўнай інерцыяльнай сістэмы адліку, пры змяненні магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, але і пры руху праваднікa ў пастаянным магнітным полі. ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў прамалінейным праваднiку, што пастпальна рухаецца ў аднародным магнітным полі, прама прапарцыянальная модулю індукцыі магнітнага поля B, даўжыні актыўнай часткі праваднікa l (часткі, што знаходзіцца ў магнітным полі), модулю папярочнай скорасці праваднікa $v_{\perp}$ і сінусу вугла α паміж напрамкамі магнітнай індукцыі поля $\vec{B}$ і папярочнай скорасці $\vec{v}_{\perp}$ руху праваднікa: $\mathscr{E}_{інд} = Blv_{\perp}\sin\alpha$.



Рыс. 235

1. ЭРС індукцыі ў контуры роўная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, узятай з супрацьлеглым знакам (закон электрамагнітнай індукцыі Фарадэя):

$$\mathscr{E}_{інд} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

2. Электрычнае поле, якое ўзнікае пры любым змяненні магнітнага поля, называюць віхравым электрычным полем.

3. Віхравое электрычнае поле ўзнікае ў любым пункце прасторы, калі ў гэтым пункце існуе магнітнае поле, якое змяняецца з цягам часу, незалежна ад таго, ёсць там праводны контур або няма.

1. Апішыце доследы, у якіх выяўляюць з'яву электрамагнітнай індукцыі.

2. Як фармулююць закон электрамагнітнай індукцыі?

3. Чаму ў формуле, якая з'яўляецца матэматычным выразам закона электрамагнітнай індукцыі, стаіць знак «мінус»?

4. Што змянілася б у доследах Фарадэя, калі б ён выкарыстоўваў шпулі з большай колькасцю віткоў?

5. Ці адрозніваецца індукцыйны электрычны ток у правадніку ад электрычнага току, які ствараецца любой іншай крыніцай, напрыклад гальванічным элементам?

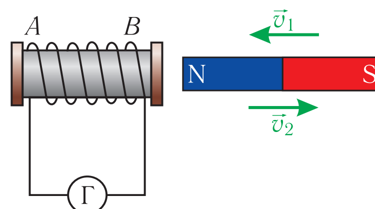
6. Якая прырода пабочных сіл, што выклікаюць з'яўленні індукцыйнага току ў нерухомым праводным контуры, змешчаным у магнітнае поле, якое змяняецца з цягам часу?

7. У чым адрозненне электрастатычнага поля ад віхравога электрычнага поля?

8*. Ад чаго залежыць ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў прамалінейным праваднікy, што пастyпальна рухаецца ў магнітным полі, якое не змяняецца з часам?

Прыклад рашэння задачы

Вызначце напрамак індукцыйнага току ў саленоідзе, які паказаны на рысунку 236.



Рыс. 236

Рашэнне. Пры набліжэнні паўночнага полюса магніта да саленоіда ў ім індуцыруецца электрычны ток такога напрамку, што бліжэйшы да магніта канец саленоіда набывае ўласцівасці паўночнага магнітнага полюса. Вызначаючы напрамак току паводле правіла свярдзёлка (правіла гадзіннікавай стрэлкі), бачым, што ток у саленоідзе ідзе ў напрамку ад пункта A да пункта B. Пры аддаленні паўночнага полюса магніта ад саленоіда ў ім ўзнікае індукцыйны ток, накіраваны ад пункта B да пункта A.

Практыкаванне 24

1. Кругавы контур радыусам $r = 12$ см знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 0{,}40$ Тл. Вызначце магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, калі: а) лініі магнітнай індукцыі паралельныя нармалі да гэтай паверхні; б) паверхня, абмежаваная контурам, паралельная лініям магнітнай індукцыі; в) лініі магнітнай індукцыі ўтвараюць вугал $\alpha = 30^\circ$ з гэтай паверхняй.

2. Вось саленоіда, які складаецца з $N = 100$ віткоў, паралельная лініям індукцыі аднароднага магнітнага поля, модуль індукцыі якога $B = 0{,}20$ Тл. Вызначце магнітны паток праз паверхні, абмежаваныя ўсімі віткамі саленоіда, калі плошча кожнай з іх $S = 16$ см^2.

3. Вызначце прамежак часу, на працягу якога магнітны паток праз паверхню, абмежаваную замкнутым праваднікам, раўнамерна паменшыўся на $\Delta\Phi = -0{,}20$ Вб, калі індуцыраваная ў праваднiку ЭРС $\mathscr{E}_{\text{інд}} = 0{,}80$ В.

4. Вызначце магнітны паток праз паверхню, абмежаваную вітком саленоіда, які складаецца з $N = 100$ віткоў, калі пры раўнамерным памяншэнні да нуля модуля індукцыі аднароднага магнітнага поля ў саленоідзе на працягу прамежку часу $\Delta t = 5{,}0$ с індуцыруецца ЭРС $\mathscr{E}_{\text{інд}} = 20$ В.

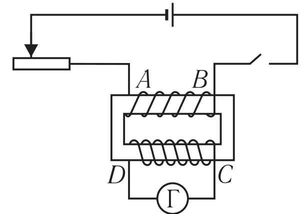
5. Вось саленоіда складае з індукцыяй аднароднага магнітнага поля вугал $\alpha = 30^{\circ}$. Плошча паверхні, абмежаванай кожным з $N = 100$ віткоў саленоіда, $S_1 = 12$ см^2. Вызначце, якая ЭРС індуцыруецца ў саленоідзе пры раўнамерным змяненні модуля індукцыі магнітнага поля са скорасцю $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 18\ \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$.

6. Праводны контур з плошчай абмежаванай ім паверхні $S = 0{,}16$ м^2 і супраціўленнем $R = 5{,}0$ мОм знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога штосекундна павялічваецца на $\Delta B = 0{,}50$ мТл. Вызначце колькасць цеплаты, якая выдзяляецца ў контуры за прамежак часу $t = 1{,}0$ ч.

7*. У аднародным магнітным полі з модулем індукцыі $B = 80$ мТл верціцца стрыжань даўжынёй $l = 1{,}0$ м з пастаяннай вуглавой скорасцю, модуль якой $\omega = 10\ \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Вось вярчэння праходзіць праз адзін з канцоў стрыжня паралельна лініям магнітнай індукцыі. Вызначце ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў стрыжні.

8*. Кругавы віток дыяметрам $D = 20$ см з меднага проваду, плошча папярочнага сячэння якога $S = 1{,}2$ мм^2, размешчаны ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 40$ мТл, перпендыкулярна лініям магнітнай індукцыі. Вызначце, які зарад пройдзе па вітку, калі: а) напрамак магнітнай індукцыі поля змяніць на супрацьлеглы; б) віток выцягнуць у складзены ўдвая адрэзак прамой. Удзельнае супраціўленне медзі $\rho = 1{,}68 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

9*. Вызначце напрамак індукцыйнага току ў шпулі CD (рыс. 237) у выпадках: а) замыкання ланцуга; б) размыкання ланцуга; в) перамяшчэння паўзунка рэастата ўправа пры замкнутым ланцугу; г) перамяшчэння паўзунка рэастата ўлева пры замкнутым ланцугу.



Рыс. 237

§ 35. З’ява самаіндукцыі. Індуктыўнасць. Энергія магнітнага поля шпулі з токам

Электрамагнітная індукцыя праяўляецца ва ўсіх выпадках змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам. Сучаснік Фарадэя амерыканскі фізік Джозеф Генры (1797—1878) незалежна ад свайго англійскага калегі адкрыў некаторыя з электрамаг-

нітных эфектаў. У 1829 г. Генры выявіў, што ЭРС індукцыі ўзнікае ў нерухомым контуры і пры адсутнасці змянення знешняга магнітнага поля. Аказалася, што электрычны ток, які змяняецца, пры праходжанні ў контуры стварае зменлівы магнітны паток. Гэтая з'ява была названа самаіндукцыяй.

Самаіндукцыя. Самаіндукцыя з'яўляецца важным прыватным выпадкам з'явы электрамагнітнай індукцыі. Калі электрычны ток у замкнутым праводным контуры па якіх-небудзь прычынах змяняецца, то змяняецца і магнітнае поле гэтага току ($B \sim I$). Але пры змяненні індукцыі магнітнага поля, якое ствараецца токам, што праходзіць у контуры, змяняецца і магнітны паток ($\Phi \sim B$). Значыць, магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, прапарцыянальны сіле току ў контуры:

$$\Phi \sim B \sim I.$$

Каэфіцыент прапарцыянальнасці паміж магнітным патокам Φ і сілай току I Томсан (лорд Кельвін) у 1853 г. прапанаваў назваць «каэфіцыент самаіндукцыі»:

$$\Phi = LI. \tag{35.1}$$

Каэфіцыент самаіндукцыі L часта называюць *індуктыўнасцю* контуру.

Індуктыўнасць у СІ вымяраюць у генры (Гн). Індуктыўнасць контуру роўная 1 Гн, калі пры сіле току ў контуры 1 А магнітны паток праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам, роўны 1 Вб.

Індуктыўнасць залежыць ад памераў і формы контуру, а таксама ад магнітных уласцівасцей асяроддзя, у якім знаходзіцца гэты контур.

Напрыклад, індуктыўнасць аднаслойнага саленоіда $L = \mu_0 \mu n^2 Sl$, дзе n — колькасць віткоў на адзінку даўжыні саленоіда, S — плошча паверхні, абмежаванай вітком, l — даўжыня саленоіда, μ — магнітная пранікальнасць асяроддзя. Павялічыць магнітную пранікальнасць асяроддзя можна ўвядзеннем у саленоід ферамагнітнага асяродка.

З формулы (35.1) вынікае, што змяніць магнітны паток можна, змяняючы сілу току ў контуры ці яго індуктыўнасць, або тое і другое адначасова. Згодна з законам электрамагнітнай індукцыі магнітны паток, які змяняецца, стварае ў контуры ЭРС, якую ў гэтым выпадку называюць *электрарухаючай сілай самаіндукцыі* або *ЭРС самаіндукцыі*:

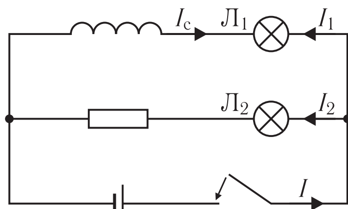
$$\mathscr{E}_\text{с} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

Калі індуктыўнасць контуру не змяняецца ў часе, г. зн. $L = \text{const}$, то

$$\mathscr{E}_c = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

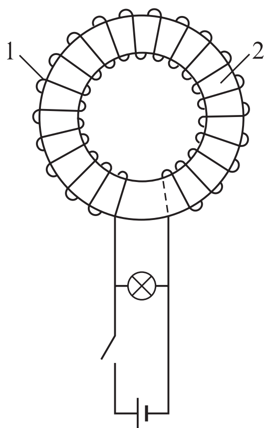
Паколькі контур замкнуты, ЭРС самаіндукцыі стварае ў ім ток самаіндукцыі, сілу якога вызначаюць па законе Ома $I_c = \frac{\mathscr{E}_c}{R}$, дзе R — супраціўленне контуру. Згодна з правілам Ленца ток самаіндукцыі заўсёды накіраваны так, што ён супрацьдзейнічае змяненню току, які ствараецца крыніцай. Пры ўзрастанні сілы току ток самаіндукцыі накіраваны супраць току крыніцы, а пры памяншэнні — напрамкі току крыніц і току самаіндукцыі супадаюць.

Назіранне самаіндукцыі. Для назірання з'явы самаіндукцыі збяром электрычны ланцуг, які складаецца са шпулі з вялікай індуктыўнасцю, рэзістара з электрычным супраціўленнем, роўным супраціўленню абмоткі шпулі, дзвюх аднолькавых лямпачак, ключа і крыніцы пастаяннага току (рыс. 238).



Рыс. 238

Пры замыканні ланцуга лямпачка $Л_2$ пачынае свяціцца практычна адразу, а лямпачка $Л_1$ — з прыкметным спазненнем. Пры ўзрастанні сілы току I_1, створанага крыніцай, на ўчастку, утвораным шпулей і лямпачкай $Л_1$, ЭРС самаіндукцыі ў шпулі мае такую палярнасць, што ток самаіндукцыі I_c, які ёю ствараецца, накіраваны насустрач току крыніц. У выніку рост сілы току на гэтым участку ланцуга запавольваецца, і сіла току $I_1 - |I_c|$ не адразу дасягае свайго максімальнага значэння.



Рыс. 239

З'яву самаіндукцыі можна назіраць і пры размыканні электрычнага ланцуга. Збяром ланцуг, які складаецца са шпулі *1* з вялікай колькасцю віткоў, наматаных на жалезны асяродак *2*, да заціскаў якой падключана лямпачка з вялікім электрычным супраціўленнем у параўнанні з супраціўленнем абмоткі шпулі (рыс. 239). У якасці крыніцы току возьмем крыніцу, ЭРС якой 2 В. Лямпачка падключана паралельна шпулі. Пры размыканні ключа захоўваецца замкнутая частка ланцуга, якая складаецца з ужо паслядоўна злучаных шпулі і лямпачкі.

Пакуль ключ замкнуты, лямпачка будзе цьмяна свяціцца, бо адносіна сіл токаў, якія праходзяць праз лямпачку і шпулю, адваротная адносіне іх супраціўленняў $\frac{I_л}{I_ш} = \frac{R_ш}{R_л}$. Аднак пры размыканні ключа можна ўбачыць, што лямпачка ярка ўспыхвае. Чаму гэта адбываецца? Пры размыканні ланцуга сіла току ў шпулі змяншаецца, што прыводзіць да ўзнікнення ЭРС самаіндукцыі. Ток самаіндукцыі, які ўзнікае ў ланцугу, згодна з правілам Ленца, супадае па напрамку з токам у шпулі, не дазваляючы яму рэзка змяншацца. Гэта і забяспечвае ўспышку лямпачкі. Заўважым, што з'ява самаіндукцыі мае месца ў любых выпадках змянення сілы току ў ланцугу, які мае індуктыўнасць, або змянення самой індуктыўнасці.

Энергія магнітнага поля. Адкуль бярэцца энергія, якая забяспечвае ўспышку лямпачкі? Гэта не энергія крыніцы току, бо яна ўжо адключана. Успышка лямпачкі адбываецца адначасова з памяншэннем сілы току ў шпулі і створанага токам магнітнага поля. Можна выказаць меркаванне, што назапашаная ў шпулі ў працэсе самаіндукцыі энергія магнітнага поля ператвараецца ва ўнутраную энергію спіралі лямпачкі і энергію яе выпраменьвання.

На самай справе, пры замыканні ланцуга, які складаецца з крыніцы току з ЭРС $\mathscr{E}_0$, шпулі індуктыўнасцю L і рэзістара супраціўленнем R, сіла току I ў ланцугу пачне ўзрастаць і з'явіцца ЭРС самаіндукцыі $\mathscr{E}_с = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Тады ў адпаведнасці з законам Ома сіла току ў ланцугу $I = \frac{\mathscr{E}_0 + \mathscr{E}_с}{R}$. Значыць,

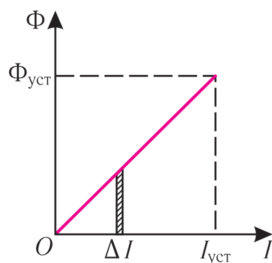
$$\mathscr{E}_0 = IR + L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Памножыўшы атрыманую роўнасць на $I\Delta t$, дзе Δt — дастаткова малы прамежак часу, на працягу якога сіла току застаецца практычна пастаяннай, знойдзем элементарную работу, якую выконваюць пабочныя сілы ў крыніцы току:

$$\mathscr{E}_0 I\Delta t = I^2 R\Delta t + LI\Delta I.$$

У працэсе ўстанаўлення току, калі сіла току I і магнітны паток $\Phi = LI$ узрастаюць, работа, якую выконваюць пабочныя сілы ў крыніцы току, перавышае колькасць цеплаты, што выдзяляецца на рэзістары. Элементарная дадатковая работа, выкананая пабочнымі сіламі за прамежак часу Δt пры пераадоленні ЭРС самаіндукцыі ў працэсе ўстанаўлення току (рыс. 240):

$$\delta A_{дад} = \Phi\Delta I.$$



Рыс. 240

Поўная дадатковая работа $A_{дад}$, роўная суме элементарных дадатковых работ $δA_{дад}$ у працэсе ўстанаўлення току, роўная суме плошчаў усіх аналагічных слупкоў, г. зн. плошчы фігуры пад графікам залежнасці $Φ = Φ(I)$ (рыс. 240):

$$A_{дад} = \frac{Φ_{уст} I_{уст}}{2} = \frac{L I_{уст}^2}{2}.$$

Гэта работа ператвараецца ў энергію магнітнага поля шпулі, таму

$$\boldsymbol{W_м = \frac{LI^2}{2}}.$$

1. З'яву ўзнікнення ЭРС індукцыі ў электрычным ланцугу ў выніку змянення сілы току ў гэтым жа ланцугу называюць самаіндукцыяй.

2. ЭРС самаіндукцыі роўная здабытку індуктыўнасці контуру (шпулі) і скорасці змянення сілы току ў ім, узятаму з супрацьлеглым знакам:

$$\mathscr{E}_с = -L\frac{ΔI}{Δt}.$$

3. Індуктыўнасць контуру роўная 1 Гн, калі пры сіле току ў контуры 1 А магнітны паток праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам, роўны 1 Вб.

4. Энергія магнітнага поля шпулі з токам прама прапарцыянальная квадрату сілы току:

$$W_м = \frac{LI^2}{2}.$$

1. Што называюць самаіндукцыяй?

2. У якіх доследах можна назіраць з'яву самаіндукцыі?

3. Ад чаго залежыць ЭРС самаіндукцыі?

4. Што называюць індуктыўнасцю? У якіх адзінках СІ яе вымяраюць?

5. Чаму для стварэння электрычнага току ў ланцугу са шпуляй індуктыўнасці крыніца току павінна затраціць энергію?

6. Як вылічыць энергію магнітнага поля шпулі з токам?

Прыклад рашэння задачы

За прамежак часу $\Delta t = 9{,}50$ мс сіла току ў шпулі індуктыўнасці раўнамерна ўзрасла ад $I_1 = 1{,}60$ А да $I_2 = 2{,}40$ А. Пры гэтым у шпулі ўзнікла ЭРС самаіндукцыі $\mathscr{E}_c = -14{,}0$ В. Вызначце ўласны магнітны паток у канцы працэсу нарастання току і прырашчэнне энергіі магнітнага поля шпулі.

Дадзена:
$\Delta t = 9{,}50$ мс $= 9{,}50 \cdot 10^{-3}$ с
$I_1 = 1{,}60$ А
$I_2 = 2{,}40$ А
$\mathscr{E}_c = -14{,}0$ В

Φ_c — ? $\Delta W_м$ — ?

Рашэнне. Пры змяненні ў шпулі сілы току ад I_1 да I_2 узнікае ўласны магнітны паток, $\Phi_c = LI_2$. Індуктыўнасць L шпулі можна вызначыць з закона электрамагнітнай індукцыі для з'явы самаіндукцыі: $\mathscr{E}_c = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = -L\frac{I_2 - I_1}{\Delta t}$.

Значыць, $L = -\frac{\mathscr{E}_c \Delta t}{I_2 - I_1} = \frac{\mathscr{E}_c \Delta t}{I_1 - I_2}$. Тады $\Phi_c = \frac{\mathscr{E}_c \Delta t I_2}{I_1 - I_2}$.

$$\Phi_c = \frac{-14{,}0\ \text{В} \cdot 9{,}50 \cdot 10^{-3}\ \text{с} \cdot 2{,}40\ \text{А}}{1{,}60\ \text{А} - 2{,}40\ \text{А}} = 0{,}399\ \text{Вб} = 399\ \text{мВб}.$$

Прырашчэнне энергіі магнітнага поля шпулі

$$\Delta W_м = W_{м2} - W_{м1} = \frac{LI_2^2}{2} - \frac{LI_1^2}{2} = \frac{L}{2}(I_2^2 - I_1^2) = \frac{-\mathscr{E}_c \Delta t (I_2^2 - I_1^2)}{2(I_2 - I_1)} = \frac{-\mathscr{E}_c \Delta t (I_2 + I_1)}{2}.$$

$$\Delta W_м = \frac{-(-14{,}0\ \text{В}) \cdot 9{,}50 \cdot 10^{-3}\ \text{с} \cdot (2{,}40\ \text{А} + 1{,}60\ \text{А})}{2} = 0{,}266\ \text{Дж} = 266\ \text{мДж}.$$

Адказ: $\Phi_c = 399$ мВб, $\Delta W_м = 266$ мДж.

Практыкаванне 25

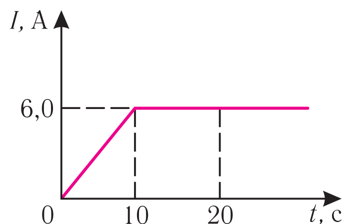
1. Па замкнутым праводным контуры праходзіць электрычны ток сілай $I = 1{,}2$ А. Магнітнае поле гэтага току стварае магнітны паток $\Phi = 3{,}0$ мВб праз паверхню, абмежаваную контурам. Вызначце індуктыўнасць контуру.

2. Пры раўнамерным змяненні сілы току ў шпулі на $\Delta I = -4{,}0$ А за прамежак часу $\Delta t = 0{,}10$ с у шпулі ўзнікае ЭРС самаіндукцыі $\mathscr{E}_c = 20$ В. Вызначце індуктыўнасць шпулі.

3. Вызначце ЭРС самаіндукцыі, якая ўзнікае ў шпулі індуктыўнасцю $L = 1{,}2$ Гн, пры раўнамерным змяненні сілы току ад $I_1 = 2{,}0$ А да $I_2 = 6{,}0$ А за

прамежак часу $\Delta t = 0{,}60$ с. Вызначце, на колькі пры гэтым змянілася энергія магнітнага поля.

4. На рысунку 241 паказаны графік залежнасці сілы току ў шпулі індуктыўнасцю $L = 10$ мГн ад часу. Вызначце ЭРС самаіндукцыі праз прамежкі часу $t_1 = 10$ с і $t_2 = 20$ с ад моманту пачатку адліку часу.



Рыс. 241

5. Сіла току ў шпулі раўнамерна зменшылася ад $I_1 = 10$ А да $I_2 = 5{,}0$ А. Пры гэтым энергія магнітнага поля змянілася на $\Delta W_м = -3{,}0$ Дж. Вызначце індуктыўнасць шпулі і першапачатковае значэнне энергіі магнітнага поля.

6. Вызначце ЭРС самаіндукцыі, якая ўзнікае ў шпулі індуктыўнасцю $L = 0{,}12$ Гн пры раўнамерным змяншэнні сілы току ад $I_1 = 8{,}0$ А, калі за прамежак часу $t_1 = 0{,}20$ с энергія магнітнага поля зменшылася ў два разы.

Лабараторны эксперимент

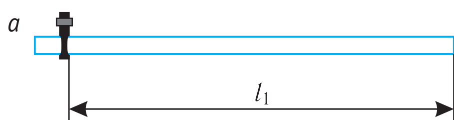
Лабараторная работа 1

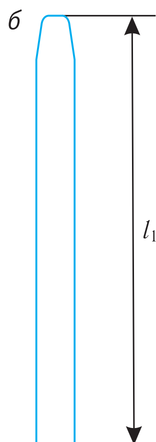
Вывучэнне ізатэрмічнага працэсу

Мэта: даследаваць залежнасць ціску газу дадзенай масы ад займаемага ім аб'ёму пры пастаяннай тэмпературы.

Абсталяванне: празрыстая сіліконавая трубка дыяметрам 8—10 мм з заціскам або коркам на канцы (шкляная трубка дыяметрам 10—12 мм і даўжынёй 60 см, запаяная з аднаго канца); мензурка (250 мл) з вадой пакаёвай тэмпературы; паддон; вымяральная стужка (лінейка), барометр-анероід (адзін на клас).

Вывад разліковай формулы





Рыс. 242

Згодна з законам Бойля—Марыёта пры пастаяннай тэмпературы параметры p_1 і V_1 пачатковага стану газу дадзенай масы і параметры p_2 і V_2 яго канчатковага стану звязаны суадносінай $p_1V_1 = p_2V_2$.

Даследуемым газам у дадзенай рабоце з'яўляецца паветра, якое знаходзіцца ўнутры празрыстай сіліконавай трубкі з заціскам або коркам на канцы (шкляной трубкі) (рыс. 242, *а* (*б*)).

Паколькі ўнутраная поласць трубкі мае форму цыліндра і плошча S яе папярочнага сячэння аднолькавая па ўсёй даўжыні трубкі, то $V_1 = Sl_1$ і $V_2 = Sl_2$, дзе l_1 і l_2 — даўжыні слупа паветра ў трубцы ў пачатковым і канчатковым станах адпаведна.

Значыць, $p_1Sl_1 = p_2Sl_2$ або $\dfrac{p_2}{p_1} = \dfrac{l_1}{l_2}$.

Пры выкананні работы правяраюць праўдзівасць гэтай роўнасці.

Парадак выканання работы

1. Закрыйце заціск на адным канцы сіліконавай трубкі і вымерайце даўжыню l_1 слупа паветра ў трубцы ў пачатковым стане.
2. Вымерайце ціск p_1 паветра ў пачатковым стане, выкарыстаўшы барометр-анероід.

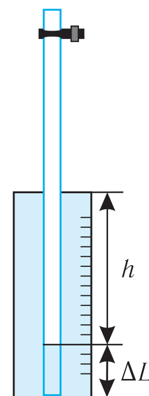
3. Пастаўце мензурку на паддон і запоўніце яе вадой пакаёвай тэмпературы так, каб пры апусканні трубкі вада ў мензурцы паднялася да яе верхняга краю.

4. Апусціце ў ваду трубку так, каб яе адкрыты канец апынуўся каля дна мензуркі (рыс. 243).

5. Назірайце за паступленнем вады ў трубку. Калі яно спыніцца, вымерайце даўжыню ΔL слупа вады, якая ўвайшла ў трубку.

6. Вымерайце рознасць узроўняў h вады ў мензурцы і трубцы.

7. Вылічыце даўжыню l_2 слупа паветра ў трубцы ў канчатковым стане: $l_2 = l_1 - \Delta L$.



Рыс. 243

8. Вылічыце ціск $p_в$ слупа вады па формуле $p_в = \rho g h$, дзе ρ — шчыльнасць вады (прыміце $\rho = 1000\ \frac{кг}{м^3}$). Значэнне паскарэння свабоднага падзення прыміце $g = 9{,}810\ \frac{м}{с^2}$.

9. Вылічыце ціск p_2 паветра ў трубцы ў канчатковым стане: $p_2 = p_1 + p_в$. Вынік вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табліцу.

10. Вылічыце адносіны $\frac{p_2}{p_1}$ і $\frac{l_1}{l_2}$. Вынікі вылічэнняў, акругліўшы з дакладнасцю да тысячных, запішыце ў табліцу. Параўнайце атрыманыя вынікі і зрабіце вывад.

l_1, м	p_1, Па	ΔL, м	h, м	l_2, м	$p_в$, Па	p_2, Па	$\frac{p_2}{p_1}$	$\frac{l_1}{l_2}$

11. Вылічыце адносную хібнасць ε_1 вымярэння адносіны $\frac{p_2}{p_1}$:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta p}{p_1} + \frac{\Delta p}{p_2},$$

дзе $\Delta p = \Delta_i p + \Delta_a p$ (Δ_i — абсалютная інструментальная хібнасць прыбора; Δ_a — абсалютная хібнасць адліку (гл. дадатак).

12. Вылічыце абсалютную хібнасць Δ_1 вымярэння адносіны $\frac{p_2}{p_1}$:

$$\Delta_1 = \varepsilon_1 \frac{p_2}{p_1}.$$

13. Вылічыце адносную хібнасць ε_2 вымярэння адносіны $\frac{l_1}{l_2}$:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}, \text{ дзе } \Delta l = \Delta_{\text{і}} l + \Delta_{\text{а}} l.$$

14. Вылічыце абсалютную хібнасць Δ_2 вымярэння адносіны $\frac{l_1}{l_2}$:

$$\Delta_2 = \varepsilon_2 \frac{l_1}{l_2}.$$

15. Запішыце вынікі вымярэнняў у выглядзе падвойных няроўнасцей:

$$\frac{p_2}{p_1} - \Delta_1 < \frac{p_2}{p_1} < \frac{p_2}{p_1} + \Delta_1; \quad \frac{l_1}{l_2} - \Delta_2 < \frac{l_1}{l_2} < \frac{l_1}{l_2} + \Delta_2.$$

16. Параўнайце атрыманыя інтэрвалы значэнняў і зрабіце вывад.

Калі інтэрвалы перакрываюцца, то адносіны ціскаў і даўжынь слупа паветра ў трубцы пры дадзенай адноснай хібнасці вымярэнняў аднолькавыя, што і пацвярджае праўдзівасць правяраемай роўнасці.

Кантрольныя пытанні

1. Пры якіх умовах для вызначэння параметраў стану газу можна выкарыстоўваць ураўненне $pV = \text{const}$?
2. Чаму пры выкананні дадзенай работы працэс змянення аб'ёму паветра можна лічыць практычна ізатэрмічным?
3. Што ўплывае на дакладнасць атрыманых вынікаў?

Суперзаданне

Вызначце матэматычную залежнасць паміж шчыльнасцю і ціскам паветра ў трубцы. Выкарыстоўваючы вынікі, атрыманыя пры выкананні дадзенай работы, і тэрмометр, пабудуйце графік залежнасці шчыльнасці паветра ў трубцы ад ціску.

Лабараторная работа 2

Вывучэнне ізабарнага працэсу

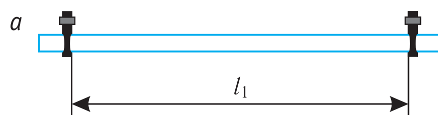
Мэта: даследаваць залежнасць аб'ёму газу дадзенай масы ад тэмпературы пры пастаянным ціску.

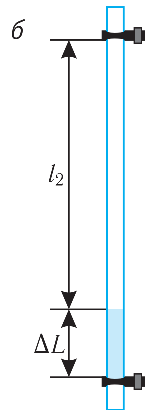
Абсталяванне: празрыстая сіліконавая трубка дыяметрам 8—10 мм і даўжынёй 80—100 см з двума заціскамі (коркамі) на канцах; тэрмометр; знешняя шклянка каларыметра; вымяральная стужка (лінейка); пасудзіна з вадой пры тэмпературы 55—60 °C; пасудзіна з вадой пакаёвай тэмпературы.

Вывад разліковай формулы

Згодна з законам Гей-Люсака пры пастаянным ціску параметры V_1 і T_1 пачатковага стану газу дадзенай масы, параметры V_2 і T_2 яго канчатковага стану звязаны суадносінай $\frac{V_1}{T_1}=\frac{V_2}{T_2}$.

Даследуемым газам у дадзенай рабоце з'яўляецца паветра, якое знаходзіцца ўнутры празрыстай сіліконавай трубкі з заціскамі (коркамі) на канцах.





Рыс. 244

Паколькі ўнутраная поласць трубкі мае форму цыліндра і плошча S яе папярочнага сячэння аднолькавая па ўсёй даўжыні трубкі, то $V_1=Sl_1$ і $V_2=Sl_2$, дзе l_1 і l_2 — даўжыні слупа паветра ў трубцы ў пачатковым (рыс. 244, *а*) і канчатковым (рыс. 244, *б*) станах адпаведна.

Значыць, $\frac{Sl_1}{T_1}=\frac{Sl_2}{T_2}$ або $\frac{T_1}{T_2}=\frac{l_1}{l_2}$.

Пры выкананні работы правяраюць праўдзівасць гэтай роўнасці.

Парадак выканання работы

1. Вымерайце даўжыню l_1 слупа паветра ў трубцы ў пачатковым стане (гл. рыс. 244, а).

2. Трубку шчыльна ўкладзіце ўнутры шклянкі каларыметра, папярэдне закрыўшы заціск, які размешчаны паблізу дна. Верхні заціск пакіньце адкрытым.

3. Запоўніце шклянку каларыметра вадой, папярэдне нагрэтай да тэмпературы 55—60 °С, так, каб канец трубкі з верхнім зацiскам быў апушчаны ў ваду не больш чым на 5—10 мм.

4. Змясціце тэрмометр у ваду. Назірайце за выдзяленнем з трубкі бурбалак паветра. Як толькі яно спыніцца, вызначце значэнне тэмпературы T_1 цёплага паветра, якое знаходзіцца ў трубцы.

5. Закрыйце верхні зацiск, зліце нагрэтую ваду і запоўніце шклянку вадой пакаёвай тэмпературы да ранейшага ўзроўню (канец трубкі з верхнім зацiскам трэба апусціць у ваду не больш чым на 5—10 мм). Адкрыйце верхні зацiск.

6. Праз 1—2 мінуты пасля ўсталявання цеплавой раўнавагі вызначце па паказанні тэрмометра тэмпературу T_2 паветра, якое знаходзіцца ў трубцы.

7. Закрыйце верхні зацiск і зліце ваду са шклянкі каларыметра. Дастаньце трубку, падтрасіце яе і, размясціўшы вертыкальна, вымерайце даўжыню ΔL слупа вады, якая ўвайшла ў трубку (гл. рыс. 244, *б*).

8. Вылічыце даўжыню l_2 слупа паветра ў трубцы пасля ахаладжэння:

$$l_2 = l_1 - \Delta L.$$

Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табліцу.

9. Вылічыце адносіны $\frac{T_1}{T_2}$ і $\frac{l_1}{l_2}$. Вынікі вылічэнняў, акругліўшы з дакладнасцю да сотых, запішыце ў табліцу. Параўнайце атрыманыя вынікі і зрабіце вывад.

l_1, м	T_1, К	T_2, К	ΔL, м	l_2, м	$\frac{T_1}{T_2}$	$\frac{l_1}{l_2}$

10. Вылічыце адносную хібнасць ε_1 вымярэння адносіны $\frac{T_1}{T_2}$:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}, \text{ дзе } \Delta T = \Delta_і T + \Delta_а T.$$

11. Вылічыце абсалютную хібнасць Δ_1 вымярэння адносіны $\frac{T_1}{T_2}$:

$$\Delta_1 = \varepsilon_1 \frac{T_1}{T_2}.$$

12. Вылічыце адносную хібнасць ε_2 вымярэння адносіны $\frac{l_1}{l_2}$:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}, \text{ дзе } \Delta l = \Delta_\text{i} l + \Delta_\text{a} l .$$

13. Вылічыце абсалютную хібнасць Δ_2 вымярэння адносіны $\frac{l_1}{l_2}$:

$$\Delta_2 = \varepsilon_2 \frac{l_1}{l_2} .$$

14. Запішыце вынікі вымярэнняў у выглядзе падвойных няроўнасцей:

$$\frac{T_1}{T_2} - \Delta_1 < \frac{T_1}{T_2} < \frac{T_1}{T_2} + \Delta_1; \quad \frac{l_1}{l_2} - \Delta_2 < \frac{l_1}{l_2} < \frac{l_1}{l_2} + \Delta_2.$$

15. Параўнайце атрыманыя інтэрвалы значэнняў і зрабіце вывад.

Кантрольныя пытанні

1. Пры якіх умовах для вызначэння параметраў стану газу можна выкарыстоўваць ураўненне $V = \text{const}\ T$?
2. Чаму пры выкананні дадзенай работы працэс ахалоджвання паветра можна лічыць практычна ізабарным?
3. Як вызначыць, калі адбылося выраўноўванне тэмпературы паветра ў трубцы і тэмпературы нагрэтай вады ў шклянцы каларыметра?

Суперзаданне

Выкарыстаўшы абсталяванне для дадзенай лабараторнай работы, барометр-анероід і штангенцыркуль, вызначце масу паветра ў трубцы.

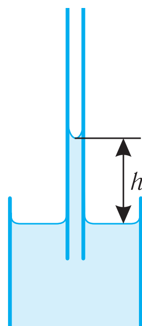
Лабараторная работа 3

Вымярэнне паверхневага нацяжэння

Мэта: вымераць паверхневае нацяжэнне вадкасці.

Абсталяванне: капілярная трубка; клін вымяральны (металічная іголка); мікраметр (штангенцыркуль); лінейка; шклянка каларыметра з дыстыляванай вадой; тэрмометр для вымярэння тэмпературы паветра ў кабінеце.

Вывад разліковай формулы



Рыс. 245

Калі змясціць капілярную трубку адным канцом ў налітую ў шырокую пасудзіну вадкасць, якая цалкам змочвае трубку, то паверхня вадкасці ў трубцы будзе вышэй, чым у пасудзіне (рыс. 245). Вышыню падымання вадкасці ў капілярнай трубцы можна вызначыць па формуле $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$, дзе σ —паверхневае нацяжэнне вадкасці, ρ — шчыльнасць вадкасці, r — унутраны радыус капілярнай трубкі, g — модуль паскарэння свабоднага падзення.

Такім чынам, ведаючы вышыню падымання вадкасці вядомай шчыльнасці ў капілярнай трубцы вядомага радыуса, можна вызначыць паверхневае нацяжэнне гэтай вадкасці: $\sigma = \frac{\rho g r h}{2}$ або $\sigma = \frac{\rho g D h}{4}$, дзе $D = 2r$ — унутраны дыяметр капілярнай трубкі.

Пры выкананні работы значэнне паскарэння свабоднага падзення прыміце $g = 9{,}810\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Значэнні паверхневага нацяжэння σ вады на мяжы з паветрам і шчыльнасці ρ дыстыляванай вады пры рознай тэмпературы t і нармальным атмасферным ціску прыведзены ў табліцы.

t, °C	σ, $10^{-3}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	ρ, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	t, °C	σ, $10^{-3}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	ρ, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
10	74,20	999,700	18	73,05	998,595
11	74,07	999,605	19	72,89	998,405
12	73,92	999,498	20	72,75	998,203
13	73,78	999,377	21	72,60	997,992
14	73,64	999,244	22	72,44	997,770
15	73,48	999,099	23	72,28	997,538
16	73,34	998,943	24	72,12	997,296
17	73,20	998,774	25	71,96	997,044

Парадак выканання работы

1. Вымерайце тэмпературу паветра ў кабінеце. Запішыце ў табліцу значэнне шчыльнасці ρ вады, якое адпавядае дадзенай тэмпературы.

2. Вымерайце ўнутраны дыяметр D капілярнай трубкі, выкарыстаўшы клін вымяральны (металічную іголку) і мікраметр (штангенцыркуль).

Для вымярэння дыяметра капілярнай трубкі ўстаўце ў яе клін да ўпору і пазначце мяжу судотыку кліна і трубкі (рыс. 246). Палічыўшы дыяметр кліна на гэтай мяжы роўным унутранаму дыяметру трубкі, вымерайце яго, выкарыстаўшы мікраметр (штангенцыркуль).

Рыс. 246

3. Апусціце капілярную трубку ў шклянку з вадой пакаёвай тэмпературы. Назірайце падыманне вады ў капілярнай трубцы. Праз невялікі прамежак часу (прыкладна 1 мін), размясціўшы капілярную трубку так, каб яна не датыкалася да дна шклянкі, вымерайце вышыню h падымання вады ў трубцы.

4. Вылічыце паверхневае нацяжэнне σ вады.

Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табліцу.

ρ, $\frac{кг}{м^3}$	D, м	h, м	σ, $\frac{Н}{м}$

5. Вылічыце адносную хібнасць ε_σ ускосных вымярэнняў паверхневага нацяжэння вады:

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}, \text{ дзе } \Delta D = \Delta_i D + \Delta_a D,\ \Delta h = \Delta_i h + \Delta_a h.$$

6. Вылічыце абсалютную хібнасць $\Delta\sigma$ ускосных вымярэнняў паверхневага нацяжэння вады: $\Delta\sigma = \varepsilon_\sigma \sigma$.

7. Запішыце вынікі вымярэнняў паверхневага нацяжэння вады ў выглядзе

$$\sigma = (\sigma \pm \Delta\sigma)\ \frac{Н}{м}, \quad \varepsilon_\sigma = \qquad \%.$$

8. Параўнайце атрыманае і таблічнае значэнні паверхневага нацяжэння вады. Зрабіце вывад.

Кантрольныя пытанні

1. Які фізічны сэнс паверхневага нацяжэння? У якіх адзінках СІ яго вымяраюць?
2. Чаму паверхневае нацяжэнне залежыць ад роду вадкасці?
3. Чаму плошча свабоднай паверхні вадкасці мінімальная?

Суперзаданне

Прааналізуйце залежнасць паверхневага нацяжэння дадзенай вадкасці ад тэмпературы, выкарыстоўваючы табліцу (с. 255). Як будзе змяняцца вышыня падымання вадкасці ў капілярнай трубцы пры змяненні тэмпературы вадкасці?

Лабараторная работа 4

Вымярэнне ЭРС і ўнутранага супраціўлення крыніцы току

Мэта: вымераць ЭРС і ўнутранае супраціўленне крыніцы пастаяннага току.

Абсталяванне: гальванічны элемент (батарэйка 1,5—4,5 В); вальтметр; амперметр; рэастат; ключ; злучальныя правады.

Вывад разліковых формул

Згодна з законам Ома для поўнага ланцуга ЭРС $\mathscr{E}$ крыніцы току, яго ўнутранае супраціўленне r, сіла току I у ланцугу і супраціўленне R знешняга ўчастка ланцуга звязаны суадносінай $\mathscr{E} = IR + Ir$.

З улікам таго, што напружанне на знешнім участку ланцуга $U = IR$, атрымаем

$$\mathscr{E} = U + Ir.$$

Калі выканаць непасрэдныя вымярэнні сілы току I_1 і I_2 і напружання U_1 і U_2 пры двух розных значэннях супраціўлення знешняга ўчастка ланцуга, то атрымаем сістэму, якая складаецца з двух ураўненняў:

$$\begin{cases} \mathscr{E} = U_1 + I_1 r, \\ \mathscr{E} = U_2 + I_2 r. \end{cases}$$

Адсюль унутранае супраціўленне крыніцы пастаяннага току

$$r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2},$$

з яго ЭРС
$$\mathscr{E} = \frac{I_1U_2 - I_2U_1}{I_1 - I_2}.$$

Замест рэастата можна выкарыстаць два рэзістары, супраціўленні R_1 і R_2 якіх вядомыя. Тады формулы для разліку ўнутранага супраціўленя r і ЭРС $\mathscr{E}$ крыніцы пастаяннага току прымуць выгляд: $r = \frac{I_2R_2 - I_1R_1}{I_1 - I_2}$, $\mathscr{E} = \frac{I_1I_2(R_2 - R_1)}{I_1 - I_2}$.

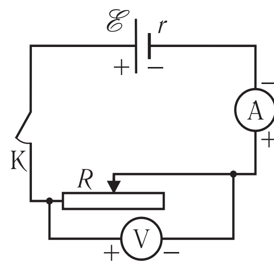
Парадак выканання работы

1. Збярыце электрычны ланцуг па схеме, паказанай на рысунку 247.

2. Пры разамкнутым ключы праверце надзейнасць кантактных злучэнняў і правільнасць падключэння электравымяральных прыбораў.

3. Правядзіце не менш за шэсць вымярэнняў сілы току і напружання на знешнім участку ланцуга пры розных становішчах рухомага кантакту рэастата.

4. Вылічыце ўнутранае супраціўленне r і ЭРС $\mathscr{E}$ крыніцы пастаяннага току для кожнай пары вынікаў вымярэнняў.



Рыс. 247

5. Вылічыце сярэднія значэння ўнутранага супраціўлення $\langle r \rangle$ і ЭРС $\langle \mathscr{E} \rangle$ крыніцы току.

Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табліцу.

<table>
<tr><th>№ доследу</th><th>U, В</th><th>I, А</th><th>r, Ом</th><th>$\langle r \rangle$, Ом</th><th>$\mathscr{E}$, В</th><th>$\langle \mathscr{E} \rangle$, В</th></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="6"></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>2</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td></td><td></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>4</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>5</td><td></td><td></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>6</td><td></td><td></td></tr>
</table>

6. Пабудуйце графік залежнасці напружання U на знешнім участку ланцуга ад сілы току I у ланцугу.

7. Прадоўжыце графік да скрыжавання з каардынатнымі восямі. Па графіку вызначце ЭРС $\mathscr{E}$ крыніцы току. Выкарыстаўшы даныя графіка, вызначце ўнутранае супраціўленне r крыніцы току.

З графіка і ўраўнення $\mathscr{E} = U + Ir$ вынікае, што пры $I = 0$ (ланцуг разамкнуты) $\mathscr{E} = U$; пры $U = 0$ сіла току ў ланцугу максімальная, і ўнутранае супраціўленне крыніцы току можна вызначыць па формуле $r = \frac{\mathscr{E}}{I_{\max}}$.

8. Пры разамкнутым ключы падключыце вальтметр да крыніцы току і вымерайце яго ЭРС $\mathscr{E}$.

9. Параўнайце вынікі вылічэння сярэдняга значэння ЭРС $\langle \mathscr{E} \rangle$ крыніцы току (п. 5), вызначэння ЭРС $\mathscr{E}$ па графіку (п. 7) і прамых вымярэнняў ЭРС $\mathscr{E}$ (п. 8).

10. Вылічыце абсалютную хібнасць $\Delta\mathscr{E}$ прамых вымярэнняў ЭРС крыніцы току: $\Delta\mathscr{E} = \Delta_i\mathscr{E} + \Delta_a\mathscr{E}$.

11. Вылічыце адносную хібнасць $\varepsilon_{\mathscr{E}}$ прамых вымярэнняў ЭРС крыніцы току: $\varepsilon_{\mathscr{E}} = \frac{\Delta\mathscr{E}}{\mathscr{E}}$.

12. Запішыце вынікі прамых вымярэнняў ЭРС крыніцы току ў выглядзе:

$$\mathscr{E} = (\mathscr{E} \pm \Delta\mathscr{E})\ \text{В};\ \varepsilon_{\mathscr{E}} = \qquad \%.$$

Кантрольныя пытанні

1. Чаму адрозніваюцца паказанні вальтметра, падключанага да крыніцы току, пры разамкнутым і пры замкнутым ключы?

2. Ад чаго залежыць магутнасць току на знешнім участку ланцуга для дадзенай крыніцы току?

3. Як змяняецца каэфіцыент карыснага дзеяння крыніцы току пры павелічэнні даўжыні актыўнай часткі рэастата?

Суперзаданне

Выкарыстаўшы вынікі, атрыманыя пры выкананні дадзенай работы, вызначце максімальную магутнасць току на знешнім участку поўнага ланцуга.

Дадатак

Вылічэнне хібнасцей вымярэнняў

Выкананне лабараторных работ звязана з вымярэннем фізічных велічынь, г. зн. вызначэннем значэнняў велічынь доследным шляхам з дапамогай вымяральных прыбораў (сродкаў вымярэння), і апрацоўкай вынікаў вымярэнняў.

Адрозніваюць прамыя і ўскосныя вымярэнні. Пры гэтым вынік любога вымярэння з'яўляецца прыблізным, г. зн. змяшчае хібнасць вымярэння. Дакладнасць вымярэння фізічнай велічыні характарызуюць абсалютная і адносная хібнасці.

Прамое вымярэнне — вызначэнне значэння фізічнай велічыні непасрэдна з дапамогай вымяральнага прыбора.

Абсалютную хібнасць прамых вымярэнняў вызначаюць сумай абсалютнай інструментальнай хібнасці і абсалютнай хібнасці адліку

$$\Delta x = \Delta_i x + \Delta_a x$$

пры ўмове, што выпадковая хібнасць і хібнасць вымярэння або адсутнічаюць, або нязначныя і іх можна не прымаць пад увагу.

Абсалютная інструментальная хібнасць $\Delta_i x$ звязана з класам дакладнасці прыбора. Абсалютныя інструментальныя хібнасці некаторых сродкаў вымярэнняў пададзены ў табліцы 1.

Табліца 1

Сродкі вымярэнняў	Дыяпазон вымярэнняў	Абсалютная інструментальная хібнасць
1	2	3
Лінейкі:		
металічныя	150, 300, 500 мм	0,1 мм
драўляныя	400, 500, 750 мм	0,5 мм
пластмасавыя	200, 250, 300 мм	1 мм
Стужка вымяральная	150 см	0,5 см

Заканчэнне табліцы 1

1	2	3
Мензуркі 2-га класа	100, 200, 250 см^3	5 см^3
Амперметр школьны	2 A	0,05 A
Міліамперметр	Ад 0 да I_{max}	4 % максімальнай мяжы вымярэнняў I_{max}
Вальтметр школьны	6 В	0,15 В
Тэрмометр лабараторны	100 °C	1 °C
Барометр-анероід	720—780 мм рт. сл.	3 мм рт. сл.
Штангенцыркулі з цаной дзялення 0,1; 0,05 мм	155, 250, 350 мм	0,1; 0,05 мм у адпаведнасці з цаной дзялення ноніуса
Мікрометры з цаной дзялення 0,01 мм	0—25, 25—50, 50—75 мм	0,004 мм

Абсалютная хібнасць адліку $\Delta_a x$ звязана з дыскрэтнасцю шкалы прыбора. Калі велічыню вымяраюць з дакладнасцю да цэлага дзялення шкалы прыбора, то хібнасць адліку прымаюць роўнай цане дзялення. Калі пры вымярэнні значэнне велічыні акругляюць да паловы дзялення шкалы, то хібнасць адліку прымаюць роўнай палове цаны дзялення.

Абсалютная хібнасць вызначае значэнне інтэрвалу, у якім ляжыць праўдзівае значэнне вымеранай велічыні: $x = x_{\text{вым}} \pm \Delta x$.

Адносную хібнасць прамога вымярэння вызначаюць адносінай абсалютнай хібнасці да значэння вымяраемай велічыні: $\varepsilon_x = \dfrac{\Delta x}{x_{\text{вым}}} \cdot 100\ \%$.

Адносная хібнасць характарызуе дакладнасць вымярэння: чым яна меншая, тым дакладнасць вымярэння вышэйшая.

Ускоснае вымярэнне — вызначэнне значэння фізічнай велічыні з выкарыстаннем формулы, якая звязвае яе з іншымі велічынямі, вымеранымі непасрэдна з дапамогай прыбораў.

Адным з метадаў вызначэння хібнасці ўскосных вымярэнняў з'яўляецца метад меж хібнасцей. Формулы для вылічэння абсалютных і адносных хібнасцей ускосных вымярэнняў метадам меж хібнасцей пададзены ў табліцы 2.

Табліца 2

Від функцыі y	Абсалютная хібнасць Δy	Адносная хібнасць $\frac{\Delta y}{y}$
1	2	3
$x_1 + x_2$	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$\frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{\lvert x_1 + x_2 \rvert}$
$x_1 - x_2$	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$\frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{\lvert x_1 - x_2 \rvert}$
Cx	$C\Delta x$	$\frac{\Delta x}{x}$
$x_1 x_2$	$\lvert x_1 \rvert \Delta x_2 + \lvert x_2 \rvert \Delta x_1$	$\frac{\Delta x_1}{\lvert x_1 \rvert} + \frac{\Delta x_2}{\lvert x_2 \rvert}$
$\frac{x_1}{x_2}$	$\frac{\lvert x_1 \rvert \Delta x_2 + \lvert x_2 \rvert \Delta x_1}{x_2^2}$	$\frac{\Delta x_1}{\lvert x_1 \rvert} + \frac{\Delta x_2}{\lvert x_2 \rvert}$
x^n	$\lvert n \rvert \lvert x \rvert^{n-1} \Delta x$	$\lvert n \rvert \frac{\Delta x}{\lvert x \rvert}$
$\ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta x}{x \lvert \ln x \rvert}$

Заканчэнне табліцы 2

1	2	3
$\sin x$	$\lvert\cos x\rvert \Delta x$	$\dfrac{\Delta x}{\lvert \operatorname{tg} x\rvert}$
$\cos x$	$\lvert\sin x\rvert \Delta x$	$\lvert \operatorname{tg} x\rvert \Delta x$
$\operatorname{tg} x$	$\dfrac{\Delta x}{\cos^2 x}$	$\dfrac{2\Delta x}{\lvert \sin 2x\rvert}$

Абсалютную хібнасць таблічных велічынь і фундаментальных фізічных пастаянных вызначаюць як палову адзінкі апошняга разраду значэння велічыні.

Адказы да практыкаванняў

Практыкаванне 1. 1. $M(H_2O) = 18\frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(H_2O) = 3{,}0 \cdot 10^{-23}$ г; $M(CO_2) = 44\frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(CO_2) = 7{,}3 \cdot 10^{-23}$ г; $M(NH_3) = 17\frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(NH_3) = 2{,}8 \cdot 10^{-23}$ г; $M(HNO_3) = 63\frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(HNO_3) = 1{,}0 \cdot 10^{-22}$ г. **2.** $\nu = 11$ моль, $N = 6{,}6 \cdot 10^{24}$. **3.** $m = 2{,}5$ г. **4.** $\frac{N_\text{м}}{N_\text{а}} = 1{,}4$. **5.** $V = 17$ см^3. **6.** $l = 1{,}6 \cdot 10^{-9}$ м, $d = 6{,}4 \cdot 10^{-10}$ м, $m_0 = 4{,}7 \cdot 10^{-25}$ кг. **7.** $m = 78$ г. **8.** $V = 3{,}5$ л. **9.** $N_2 = 1{,}3 \cdot 10^{14}$.

Практыкаванне 2. 1. $n = 2{,}3 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$. **2.** $p_2 = 28$ кПа. **3.** $\langle E_\text{к} \rangle = 5{,}6 \cdot 10^{-21}$ Дж. **4.** $\langle E_\text{к} \rangle = 1{,}5 \cdot 10^{-22}$ Дж. **5.** $\langle v^2 \rangle = 2{,}5 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$. **6.** $\frac{p_2}{p_1} = 6$. **7.** $\frac{p_2}{p_1} = 2{,}2$.

Практыкаванне 3. 1. $T = 220$ К. **2.** $t_1 = 200$ °С, $t_2 = -153$ °С. **3.** $\langle E_\text{к} \rangle = 6{,}1 \cdot 10^{-21}$ Дж. **4.** $N = 1{,}0 \cdot 10^{21}$. **5.** $p = 1{,}2$ МПа. **6.** $\Delta t = 297$ °С. **7.** $\rho = 1{,}2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. **8.** $t = 98$ °F. **9.** Павялічыцца на 44 %.

Практыкаванне 4. 1. $\nu = 2{,}1 \cdot 10^{-2}$ моль. **2.** $p = 0{,}47$ МПа. **3.** $p_2 = 1{,}5$ МПа. **4.** $T_1 = 286$ К. **8.** $V_2 = 7{,}8$ л. **9.** Уцечкі газу не было. **10.** $p_3 = 3{,}0 \cdot 10^5$ Па.

Практыкаванне 5. 3. $F_\text{н} = 12$ мН, $A_\text{зн} = 0{,}96$ мДж. **4.** Можна, паколькі $F_\text{н} > mg$. **5.** $F_\text{н} = 28$ мкН. **6.** $V = 1{,}0$ см^3.

Практыкаванне 6. 1. $\varphi = 66$ %. **2.** $\varphi = 69$ %. **3.** Пры тэмпературы $t < 10$ °С. **4.** $\Delta m = 2{,}9 \cdot 10^6$ кг. **5.** $\varphi = 60$ %, $\rho = 7{,}3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. **6.** $t_\text{в} = 13$ °С. **7.** $\varphi_3 = 26$ %. **8.** $\varphi_2 = 2{,}9$ %.

Практыкаванне 7. 1. $U = 0{,}37$ кДж. **2.** $\Delta U = 0{,}50$ кДж. **3.** $U = 1{,}8$ кДж. **4.** $\frac{U_2}{U_1} = 2{,}0$. **5.** $U = 0{,}90$ МДж. **6.** $N = 1{,}9 \cdot 10^{20}$. **7.** $p_1 = 1{,}5 \cdot 10^5$ Па.

Практыкаванне 8. 1. $\Delta V = 4{,}0 \cdot 10^{-4}$ м^3. **2.** $A = 3{,}5$ кДж. **3.** $m = 0{,}47$ кг. **4.** $A = 5{,}5$ кДж. **5.** $A = 2{,}5$ кДж. **6.** $T_1 = 217$ К.

Практыкаванне 9. 1. $A = 84$ Дж. **2.** $\Delta U = -265$ Дж, $T_2 < T_1$. **3.** $Q = 6{,}4$ кДж. **4.** $Q = 358$ кДж. **5.** $\nu = 0{,}29$ моль. **6.** $A = 12$ кДж, $Q = 31$ кДж. **7.** $\Delta U = 75{,}0$ кДж, $Q = 125$ кДж. **8.** $m_п = 68$ г. **10.** $\frac{V_2}{V_1} = 1{,}8$.

Практыкаванне 10. 1. $\eta_t = 25$ %. **2.** $\eta_К = 25{,}6$ %. **3.** $Q_1 = 1{,}5$ кДж. **4.** $\eta_t = 25{,}0$ %, $T_1 = 400$ К. **5.** На 58 %. **6.** $m_л = 8{,}2$ кг. **7.** $N = 8$. **8.** $\langle P \rangle = 9{,}8$ кВт. **9.** $N = 110$ дзён.

Практыкаванне 11. 2. $q = -8{,}0 \cdot 10^{-14}$ Кл. **3.** $q = 4{,}8 \cdot 10^5$ Кл. **5.** $q_1' = q_2' = 1{,}5q$. **6.** $q_2' = -2{,}4 \cdot 10^{-11}$ Кл, $N_1 = 1{,}5 \cdot 10^8$. **7.** $\frac{N_с}{N} = 1{,}6 \cdot 10^{-13}$.

Практыкаванне 12. 1. $F = 8{,}1$ мкН. **2.** $r_2 = 2r_1$. **3.** $r_2 = 53$ см. **4.** $q_1 = q_2 = 3{,}4 \cdot 10^{-12}$ Кл. **5.** $F = 2{,}7 \cdot 10^{-7}$ Н, накіраваная да зараду q_1. **6.** $q_2 = -74$ нКл. **7.** $|q| = 1{,}0$ мкКл. **8.** $q_1 = -0{,}58$ нКл.

Практыкаванне 13. 1. $F = 0{,}64$ мН. **2.** $q = 4{,}0 \cdot 10^{-11}$ Кл. **3.** $\frac{q_1}{q_2} = 16$. **4.** $E = 49\ \frac{В}{м}$, уверх. **5.** $\alpha = 5{,}0^\circ$. **6.** $E = 6{,}8\ \frac{кВ}{м}$. **7.** $E = 11\ \frac{кВ}{м}$. **8.** $|\vec{a}| = 11\ \frac{м}{с^2}$, $\alpha = 21^\circ$, $S = 5{,}5$ м.

Практыкаванне 14. 2. $A = -10$ мкДж, $\Delta W_п = 10$ мкДж. **3.** $A = 8{,}0$ мкДж, $\Delta W_п = -8{,}0$ мкДж, $\Delta W_к = 8{,}0$ мкДж. **4.** $\varphi_1 = -30$ В, $\varphi_2 = 30$ В. **5.** $\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = 3$.

6. $E = 0{,}72\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, $\varphi = 0$. **7**. а) $\varphi_1 = 0{,}36$ кВ, б) $\varphi_2 = -0{,}36$ кВ; в) $\varphi_3 = 0$. **8**. $\frac{v_e}{v_p} = 42{,}8$. **9.** Калі пункт размешчаны паміж зарадамі, то $E_{\text{р1}} = 12{,}5\ \frac{\text{В}}{\text{м}}$; а калі зарады знаходзяцца з аднаго боку ад пункта, то $E_{\text{р2}} = 10{,}0\ \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Практыкаванне 15. 1. $q = 40$ нКл. **2.** $U_{23} = 0{,}24$ кВ. **3.** $U = 1{,}44 \cdot 10^9$ В. **4**. $E = 40\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. **5**. $q = 0{,}13$ нКл. **6.** $v = 2{,}7 \cdot 10^6\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. **7.** $\varphi = 0{,}66$ кВ. **8.** $A_{\text{знеш}} = 0{,}31$ мкДж.

Практыкаванне 16. 1. $C = 25$ мкФ. **2.** $d = 4{,}9$ мм. **3.** $\frac{C_2}{C_1} = 6$. **4.** $q = 0{,}80$ мкКл. **5.** $E = 0{,}45\ \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$. **6.** $E_2 = 8{,}4\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. **7.** $d = 5{,}0$ мм. **8.** $F = 44$ мН.

Практыкаванне 17. 1. $W = 4{,}0$ мДж. **2.** $d = 2{,}00$ см. **3.** $W_2 = 4$ мкДж. **4.** $W = 0{,}22$ мкДж, $E = 25\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. **5.** $E = 22\ \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, $U_2 = 0{,}66$ кВ. **6.** $U = 1{,}9$ В.

Практыкаванне 18. 1. $A_{\text{паб}} = 0{,}54$ кДж. **2.** $I = 2$ А, $U_1 = 4$ В, $U_2 = 1$ В. **4.** $I_{\text{к.з}} = 5{,}5$ А. **5.** $P_{\text{поўн}} = 10$ Вт. **6.** $Q = 2{,}1$ кДж. **7.** $U = 9{,}6$ В, $I_1 = 2{,}4$ А, $I_2 = 1{,}6$ А. **8.** $d = 40$ мм. **9.** $P_{\text{мех}} = 1{,}9$ кВт, $\eta = 73$ %. **10.** $\Delta t = 12$ °С.

Практыкаванне 19. 1. $\rho_0 = 2{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. **2**. $\alpha = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ К^{-1}. **3**. $\Delta t = 5{,}0 \cdot 10^2$ °С. **4**. $t_2 = 715$ °С. **5**. $\Delta U = 15$ Дж.

Практыкаванне 20. 1. $m = 5{,}5$ г. **2.** $N = 1{,}2 \cdot 10^{19}$. **3.** $A = 2{,}0$ МДж. **4.** $m = 2{,}4$ г. **5.** $W = 94$ кДж. **6.** $F = 2{,}23$ кН.

Практыкаванне 22. **1.** $F_{max} = 1,6$ Н, $F_{min} = 0$. **2.** $\alpha = 45^{o}$. **3.** $B = 0,40$ Тл, ад назіральніка. **4.** $\rho = 7,8 \cdot 10^{3}\ \frac{кг}{м^{3}}$. **5.** $I = 11$ А. **6.** $B_{в} = 0,05$ Тл. **7.** $B_{1max} = 0,05$ Тл. **8.** $B_{2min} = 0,03$ Тл. **9.** $r = 3,0 \cdot 10^{-2}$ м. **10.** $B_{в} = 5,8$ мкТл.

Практыкаванне 23. **1.** $F_{Л} = 5,1 \cdot 10^{-16}$ Н. **2.** $B = 2,8$ мТл. **3.** $T = 3,1 \cdot 10^{3}$ с. **4.** $W_{к} = 2,3 \cdot 10^{-17}$ Дж. **5.** $U = 2,8 \cdot 10^{2}$ В. **6.** $v = 6 \cdot 10^{3}\ \frac{м}{с}$.

Практыкаванне 24. **1.** а) $\Phi_{1} = 18$ мВб, б) $\Phi_{2} = 0$, в) $\Phi_{3} = 9,0$ мВб. **2.** $\Phi = 32$ мВб. **3.** $\Delta t = 0,25$ с. **4.** $\Phi_{1} = 1,0$ Вб. **5.** $\mathscr{E}_{інд} = -1,9$ В. **6.** $Q = 4,6$ мДж. **7.** $\mathscr{E}_{інд} = -0,4$ В. **8.** а) $q_{1} = 0,29$ Кл, б) $q_{2} = 0,14$ Кл.

Практыкаванне 25. **1.** $L = 2,5$ мГн. **2.** $L = 0,50$ Гн. **3.** $\mathscr{E}_{с} = -8,0$ В, $\Delta W_{м} = 19$ Дж. **4.** Пры $0 \le t \le 10$ с $\mathscr{E}_{с1} = -6,0$ мВ, пры $t > 10$ с $\mathscr{E}_{с2} = 0$. **5.** $L = 80$ мГн, $W_{м1} = 4,0$ Дж. **6.** $\mathscr{E}_{с} = 1,4$ В.

Змест

____
(Назва ўстановы адукацыі)

Навучальны год	Імя і прозвішча вучня	Стан вучэбнага дапаможніка пры атрыманні	Адзнака вучню за карыстанне вучэбным дапаможнікам
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			

Вучэбнае выданне

Грамыка Алена Уладзіміраўна
Зяньковіч Уладзімір Іванавіч
Луцэвіч Аляксандр Аляксандравіч
Слесар Інеса Эдуардаўна

ФІЗІКА

Вучэбны дапаможнік для 10 класа
ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі
з беларускай мовай навучання

Рэдактар *Г. І. Кашэўнікава*
Мастак вокладкі *К. У. Максімава*
Мастакі *К. У. Максімава, К. К. Шастоўскі*
Камп'ютарны набор *Н. А. Пяткоўскай, Н. М. Хаманеевай*
Камп'ютарная вёрстка *Н. М. Хаманеевай*
Карэктар *Г. І. Кашэўнікава*

Падпісана ў друк 13.06.2013. Фармат 70 × 90 $^1/_{16}$. Папера афсетная № 1.
Друк афсетны. Умоўн. друк. арк. 19,89 + 0,29 форз. Ул.-выд. арк. 15 + 0,4 форз.
Тыраж 16 750 экз. Заказ .

РУП «Выдавецтва “Адукацыя і выхаванне”».
ЛИ № 02330/639 ад 31.01.2012.
Вул. Будзённага, 21, 220070, г. Мінск.

ААТ «Паліграфічны камбінат імя Я. Коласа».
ЛП № 02330/0150496 ад 11.03.2009.
Вул. Чырвоная, 23, 220600, г. Мінск.

АСНОЎНЫЯ ФОРМУЛЫ

МАЛЕКУЛЯРНАЯ ФІЗІКА

Колькасць рэчыва
$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$$

Маса малекулы
$$m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{m}{N}$$

Канцэнтрацыя часціц рэчыва
$$n = \frac{N}{V}$$

Асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle \qquad p = \frac{2}{3} n \langle E_к \rangle \qquad p = nkT$$

Сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул газу
$$\langle E_к \rangle = \frac{3}{2} kT$$

Закон Дальтана
$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_i$$

Адносная вільготнасць паветра
$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_н} \cdot 100\%$$

Павярхнёвае нацяжэнне
$$\sigma = \frac{E_{пав}}{S} = \frac{F_н}{l}$$

Вышыня пад'ёму вадкасці ў капіляры
$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$$

Ураўненне стану ідэальнага газу

ураўненне Клапейрона
$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

ураўненне Клапейрона—Мендзялеева
$$pV = \frac{m}{M} RT$$

Ізапрацэсы ў ідэальным газе

ізатэрмічны
$$p = \frac{\text{const}}{V}$$

ізабарны
$$V = \text{const}\, T$$

ізахорны
$$p = \text{const}\, T$$

Першы закон тэрмадынамікі $\Delta U = Q + A'$

ізахорны працэс
$$Q = \Delta U$$

ізатэрмічны працэс
$$Q = A$$

ізабарны працэс
$$Q = \Delta U + A$$

адыябатны працэс
$$\Delta U = -A$$

ЭЛЕКТРАДЫНАМІКА

Электрастатыка

Закон захавання электрычнага зараду $q_1 + q_2 + \ldots + q_n = \text{const}$

Закон Кулона
$$F = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

Напружанасць электрастатычнага поля
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Патэнцыял электрастатычнага поля
$$\varphi = \frac{W_п}{q_0}$$

Поле, ствараемае ў вакууме або паветры пунктавым зарадам

модуль напружанасці
$$E = k\frac{|q|}{r^2}$$

патэнцыял
$$\varphi = k\frac{q}{r}$$

Работа сіл электрастатычнага поля па перамяшчэнні зараду

у аднародным электрастатычным полі
$$A = q_0 E d$$

паміж двума пунктамі электрастатычнага поля
$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 U_{12}$$

Электраёмістасць кандэнсатара
$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}$$

Электраёмістасць плоскага кандэнсатара
$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$$

Энергія электрастатычнага поля зараджанага кандэнсатара
$$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Пастаянны ток

ЭРС крыніцы току
$$\mathcal{E} = \frac{A_{паб}}{q}$$

Закон Ома для поўнага ланцуга
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Першы закон электролізу
$$m = kq$$

Электрамагнітныя з'явы

Закон Ампера $F_А = BI\Delta l \sin\alpha$

Сіла Лоранца $F_Л = qvB \sin\alpha$

Закон электрамагнітнай індукцыі
$$\mathcal{E}_{інд} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad \mathcal{E}_с = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Энергія магнітнага поля шпулі з токам
$$W_м = \frac{LI^2}{2}$$